



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ROSANGELA CRISTINE DA SILVA HENAUTH

**SEPARAÇÃO DE MISTURAS ÁGUA/ÓLEOS RESIDUAIS DE FRITURA (ORF)
APLICANDO A FLOTAÇÃO POR PRÉ-SATURAÇÃO INDUZIDA (FPSI) EM UMA
PLANTA SEMI-INDUSTRIAL**

Recife

2022

ROSANGELA CRISTINE DA SILVA HENAUTH

**SEPARAÇÃO DE MISTURAS ÁGUA/ÓLEOS RESIDUAIS DE FRITURA (ORF)
APLICANDO A FLOTAÇÃO POR PRÉ-SATURAÇÃO INDUZIDA (FPSI) EM UMA
PLANTA SEMI-INDUSTRIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadores: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

Coorientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo.

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

H493s Henauth, Rosangela Cristine da Silva.
Separação de misturas água/óleos residuais de fritura (orf) aplicando a flotação por pré-saturação induzida (fpsí) em uma planta semi-industrial / Rosangela Cristine da Silva Henauth. – 2022.
103 f.: il., figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.
Coorientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Recife, 2022.
Inclui referências.

1. Engenharia química. 2. Bombas multiestágio. 3. Espuma oleosa. 4. FPSI. 5. ORF. 6. Razão de reciclo. 7. Separação líquido-líquido. I. Benachour, Mohand (Orientador). II. Santos, Valdemir Alexandre dos (Orientador). III. Sarubbo, Leonie Asfora (Coorientadora). IV. Título.

UFPE

660.2 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-384

ROSANGELA CRISTINE DA SILVA HENAUTH

**SEPARAÇÃO DE MISTURAS ÁGUA/ÓLEOS RESIDUAIS DE FRITURA (ORF)
APLICANDO A FLOTAÇÃO POR PRÉ-SATURAÇÃO INDUZIDA (FPSI) EM UMA
PLANTA SEMI-INDUSTRIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovada em: 01 / 08 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mohand Benachour (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Orientador)
Universidade Católica de Pernambuco

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Otidene Rossiter Sá da Rocha (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cesar Augusto Moraes de Abreu (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Yana Batista Brandão (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

A Deus pela oportunidade de mais uma encarnação, aos espíritos amigos e protetores pela intuição precisa, a minha família, especialmente aos meus pais que sempre estiveram presentes nos grandes momentos de minha vida, ao meu noivo pelo carinho e dedicação, aos meus companheiros, de forma geral, da presente existência.

AGRADECIMENTOS

A Deus por mais uma oportunidade de reencarnação.

Aos amigos e protetores espirituais que sempre me inspiraram bons pensamentos.

Aos meus Orientadores, Prof^o. Dr. Mohand Benachour, pela confiança depositada em mim e suas palavras de encorajamento ditas em momentos pertinentes e Prof^o. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, pelo apoio técnico, profissional e pessoal durante todo o Doutorado.

A minha Co-orientadora, Prof^a. Dr^a Leonie Asfora Sarubbo, pelo seu apoio.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) pelo apoio.

Ao Reitor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Prof^o Alfredo Macedo Gomes pela oportunidade em desenvolver este trabalho nesta universidade.

A Priscila Macêdo, secretária da Pós-Graduação do Programa de Engenharia Química - PPGEQ, pela paciência em sanar minhas dúvidas, sempre disposta a ajudar.

A Fatinha pela preocupação e amizade para comigo, sem contar todos os cafés feitos para, literalmente, fazer com que ficasse mais esperta e mandasse o sono embora.

Ao técnico, do Laboratório de Química da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Pammello Pablo pela paciência, disponibilidade e carinho conferidas a mim ao longo da minha carreira profissional.

Aos meus verdadeiros Amigos de jornada terrena e, acredito que existencial, Adriana Montenegro; Alex Elton de Moura; Cleiton Ferreira da Silva; Dimas Cabral; Eugênio Pacelli; Fernandina Lima; Maria da Conceição Ferreira da Silva; Ronald Keverson; Weydja Lessa; pela força, carinho/preocupação, energia positiva, conhecimento e apoio conferidos a mim, durante essa trajetória acadêmica e pessoal.

Aos meus primos queridos, Luis Felipe Borges Henauth; Marcos Barroso Henauth Júnior; Sonny Mateus Delfin da Silva Lima pelo companheirismo, confiança e apoio dispensados a mim.

A minha grande e respeitosa Mãe, meu porto seguro e tantos outros adjetivos dispensados a sua pessoa, Rosa Cristina da Silva Henauth e ao meu Pai João de Deus Henauth Filho, que é minha fortaleza indestrutível e intransponível, sempre sendo minha bússola orientadora, por me receberem como filha para mais uma etapa de aprendizado no corpo físico e por me fazerem uma pessoa melhor a cada dia vivendo ao lado deles me concedendo amor incondicional dia após dia.

Ao meu Sobrinho João de Deus Henauth Neto, pela alegria e certeza de renovação, que ele me oferta todos os dias, com todo seu sorriso contagiante, sua energia positiva e renovadora.

Ao meu Irmão e amigo maior Renato Henauth pelo carinho e pelas conversas reconfortantes que tivemos durante esses anos de Doutorado e de vida, que foram muitos e por muitos que estão por vir!.

Ao meu esposo Robson Vasconcelos pelo companheirismo, compreensão, carinho, dedicação, paciência e, acima de tudo, pela oportunidade de estarmos juntos mais uma vez e, se permitido for, muitas outras vindouras.

Aos meus Sogros Maria Joseane de Souza e Luiz Carlos Vieira de Vasconcelos pelas palavras carinhosas e acolhida precisa nas horas de fuga do estresse.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Doutorado.

Ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) pelo apoio técnico concedido.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A indústria de produtos de limpeza, por utilizarem óleos e gorduras na obtenção de alguns de seus produtos, destaca-se como uma grande geradora de efluentes de vários tipos, entre esses, a mistura água-óleo. Estas águas oleosas são geradas principalmente na etapa de lavagem de tambores de coleta de óleos residuais de fritura (ORF). Esses resíduos são fornecidos por cozinhas pertencentes a bares, hotéis, lanchonetes, ou mesmo de ambientes domésticos. Além dos efluentes aquosos produzidos pela lavagem química dos ORF para recuperação de óleos e gorduras, os recipientes coletores (bombonas plásticas) precisam ser devolvidos com determinado grau de limpeza para a empresa responsável pela coleta. Esta situação pode sofrer um agravamento devido à formação de incrustações oleosas (graxas), na parte externa do coletor, solicitando o uso de detergentes no processo de limpeza. Dessa forma, a água oleosa contendo detergente tem sido adicionada ao referido efluente, dificultando a tarefa de recuperação da água para reuso e da fase orgânica para retorno ao processo. Neste trabalho de pesquisa, a técnica de Flotação por Pré-saturação Induzida - FPSI, foi desenvolvida e aplicada em um protótipo semi-industrial (SI) para o tratamento do efluente de uma indústria de produtos de limpeza, mais especificamente de sabão em barra. O uso de um protótipo de bancada em acrílico foi responsável pelo desenvolvimento preliminar do flotador. Na pré-saturação do efluente oleoso foram utilizadas bombas centrífugas multiestagiadas, adaptadas para produção de microbolhas de ar. Os experimentos com o FPSI-CS foram conduzidos visando a melhoria da eficiência de separação água-óleo, em função das condições de reciclo do flotador. Como variável resposta do planejamento, tipo Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR, foi utilizada a eficiência de separação água-óleo no FPSI-SI, para um teor de óleos e graxas de 950 mg.L^{-1} na alimentação do flotador, eficiências da ordem de 99% foram obtidas para uma razão de reciclo de 0,51. A condição de pré-saturação induzida trouxe indicações de mais um mecanismo auxiliar de flotação, para dar à estratégia de reaproveitamento dos ORF um caráter mais sustentável.

Palavras-chaves: bombas multiestágio; espuma oleosa; FPSI; ORF; razão de reciclo; separação líquido-líquido.

ABSTRACT

The cleaning products industry, by using oils and fats to obtain some of its products, stands out as a great generator of effluents of various types, among these, the water-oil mixture. These oily waters are generated mainly in the washing step of drums to collect residual frying oils (RFO). These residues are supplied by kitchens belonging to bars, hotels, cafeterias, or even domestic environments. In addition to the aqueous effluents produced by the chemical washing of the RFOs for the recovery of oils and fats, the collection containers (plastic drums) must be returned with a certain degree of cleanliness to the company responsible for the collection. Thus, oily water containing detergent has been added to that effluent, making it difficult to recover the water for reuse and the organic phase to return to the process. In this research work, the Induced Pre-Saturation Flotation - IPSF technique was developed and applied in a semi-industrial (IS) prototype for the treatment of effluent from a cleaning products industry, more specifically bar soap. The use of an acrylic bench prototype was responsible for the preliminary development of the float. In the pre-saturation of the oily effluent, multistage centrifugal pumps were used, adapted for the production of air microbubbles. The experiments with the IPSF-SC were carried out aiming at improving the efficiency of water-oil separation, as a function of the recycle conditions of the float. As a planning response variable, type Central Composite Rotational Design - CCRD, the water-oil separation efficiency was used in the IPSF-IS was used, for an oil and grease content of 950 mg.L^{-1} in the float feed, efficiencies of the order of 99% were obtained for a recycle ratio of 0.51. The condition of induced pre-saturation brought indications of another auxiliary flotation mechanism, to give the RFO reuse strategy a more sustainable character.

Keywords: multistage pumps; oily foam; IPSF; RFO; recycling ratio; liquid-liquid separation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reação de saponificação	22
Figura 2 - Mecanismo de coagulação com indicação das duas bem definidas.....	28
Figura 3 - Valores previstos para índices econômicos pelo Banco Central em 03/09/2021	40
Figura 4 - Esquema simplificado de um processo de flotação	42
Figura 5 - Desenho esquemático do processo de geração de microbolhas através da FAI	44
Figura 6 - Flotador nozzle	50
Figura 7 - Flotador tipo Jameson.....	51
Figura 8 - Flotador em coluna	52
Figura 9 - Flotação air sparged hydrocyclone - ASH.....	54
Figura 10 - Flotador tipo BAF	55
Figura 11 - Fluxograma do recebimento e tratamento do óleo.....	61
Figura 12 - Gradeamento	61
Figura 13 - Esquema da composição de fluxos para um processo com reciclo	62
Figura 14 - Composição de fluxos e frações de remoção oleosa em processo com reciclo	63
Figura 15 - Esquema dos componentes do Flotador com Pré-saturação Induzida.....	66
Figura 16 - Bomba centrífuga multiestágio utilizada na primeira câmara do FPSI-CS	66
Figura 17 - Espuma oleosa formada na câmara de flotação do FPSI-CS.....	67
Figura 18 - Fluxo da água oleosa através da primeira câmara do FPSI-CS	69
Figura 19 - Fluxo da água oleosa através da segunda câmara do FPSI-CS	70
Figura 20 - FPSI-CS e o descarte de espuma oleosa através de bombonas	71
Figura 21 - FPSI-CS instalado na base civil do sistema de tratamento.....	78
Figura 22 - Mancais em desalinho no FPSI-CS	78
Figura 23 - Instalações hidráulicas do FPSI-CS.....	79
Figura 24 - Diagrama simplificado de operação do FPSI-CS	80
Figura 25 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados de eficiência de separação	84
Figura 26 – Eficiência em função das vazões de reciclo e efluente no FPSI-CS	85
Figura 27 – Eficiência em função da concentração e vazão de alimentação no FPSI-CS	86
Figura 28 - Eficiência em função da concentração e vazão de reciclo no FPSI-CS.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coagulantes mais utilizados	27
Tabela 2 - Flocculantes mais utilizados	27
Tabela 3 - Eficiência eletroquímica na remoção de poluentes de águas residuárias.....	30
Tabela 4 - Eficiência de remoção no tratamento por membrana.....	31
Tabela 5 - Eficiência na remoção de poluentes por tratamento biológico.....	32
Tabela 6 - Descarte de óleo em águas residuais	35
Tabela 7 - Comparação entre sistemas FAD e FAI.....	45
Tabela 8 - Fatores codificados e reais para o DCCR do FPSI-CS	64
Tabela 9 - Discriminação dos valores investidos no FPSI-CS	71
Tabela 10 - Tabela de tarifas para consumidores industriais adotada pela COMPESA.....	73
Tabela 11 – Planejamento tipo DCCR 2 ³ com variáveis independentes em valores reais.....	80
Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA)*	82
Tabela 13 - Entradas e saídas de recursos financeiros.....	88

AGT	Análise de Gordura Total
ARPE	Agência de Regulação de Pernambuco
ASH	<i>Air Sparged Hydrocyclone</i>
BAF	<i>Bubble Accelerated Flotation</i>
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DOE	<i>Design of Experiment</i>
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
ETA	Estação de Tratamento de Água
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FAI	Flotação por Ar Induzido
Fc	Fluxo de Caixa
FPSI	Flotação por Pré-saturação Induzida
FPSI-CS	Flotação por Pré-Saturação Induzida - Cabeça de Série
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
PB	<i>Payback</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TOG	Teor de Óleo e Gordura
VAL	Valor Atual Líquido
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1.1	Óleos vegetais	18
2.1.2	Ciclo do óleo residual de fritura.....	19
2.1.3	Características do óleo residual de fritura.....	21
2.1.4	Reaproveitamento do óleo de fritura residual na produção de sabão.....	22
2.1.5	Separação do óleo (matéria-prima) da mistura residual de fritura.....	24
2.1.5.1	Tratamento físico-químico/primário.....	25
2.1.6	Tecnologias utilizadas na separação água-óleo.....	29
2.1.6.1	Separadores gravitacionais	30
2.1.6.2	Eletroquímico	30
2.1.6.3	Filtração por membrana.....	31
2.1.6.4	Biológico	32
2.1.6.4.1	<i>Biosurfactante</i>	33
2.1.6.5	Adsorção	34
2.1.7	Planejamento experimental	34
2.1.8	Metodologia de superfície de resposta - MSR.....	35
2.1.9	Estudo de viabilidade técnica e econômica – EVTE.....	35
2.1.10	Parâmetros econômicos	37
2.1.10.1	Fluxo de caixa (Fc).....	37
2.1.10.2	Valor presente líquido (VPL)	37
2.1.10.3	Taxa interna de retorno (TIR).....	38
2.1.10.4	<i>Payback</i>	39
2.2	ESTADO DA ARTE.....	40
2.2.1	Evolução histórica do processo de fabricação do sabão.....	40
2.2.2	Flotação.....	41
2.2.2.1	Flotação por ar dissolvido (FAD).....	43
2.2.2.2	Flotação por ar induzido (FAI).....	44
2.2.2.3	Flotação por ar dissolvido <i>versus</i> flotação por ar induzido	45
2.3	PARÂMETROS OPERACIONAIS DE FLOTADORES	46
2.4	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO OLEOSA Vs. PROCESSOS DE FLOTAÇÃO	49
2.4.1	Flotação <i>nozzle</i>	49

2.4.2	Flotação Jameson	50
2.4.3	Flotação em coluna	51
2.4.4	Flotação <i>air sparged hydrocyclone</i> - ASH	52
2.4.5	Flotação <i>bubble accelerated flotation</i> - BAF	54
2.5	CINÉTICA DE FLOTAÇÃO	55
3	METODOLOGIA	59
3.1	ANÁLISE DO TEOR DE ÓLEO E GRAXAS	60
3.2	CONDIÇÕES DE GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE OLEOSO	60
3.3	FPSI	62
3.4	OPERAÇÃO DO FPSI COM RECICLO	62
3.5	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	64
3.6	PROTÓTIPO DE FPSI-CS	65
3.7	OPERAÇÃO DO FPSI	68
3.8	ELABORAÇÃO DE UM FLUXO DE CAIXA PARA O FPSI-CS	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA PLANTA SEMI-INDUSTRIAL ...	77
4.1.1	Construção mecânica do FPSI-CS	77
4.2	ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS	79
4.3	PLANILHA DE FLUXO DE CAIXA E INDICADORES ECONÔMICOS	88
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	89
5.1	CONCLUSÕES	89
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIA	91

1 INTRODUÇÃO

Apesar do crescimento de fontes de energia renováveis, a demanda por fontes de petróleo deve aumentar até 2040 de acordo com projeção realizada pela IEA (*International Energy Agency*) (ELBAZ *et al.* 2015). A maioria dos processos industriais produz subprodutos, que são considerados fontes de poluição e, como tal, requerem tratamento (PAIXÃO; BALABAN, 2018).

As águas residuais oleosas, que constituem uma grande parte das águas residuais industriais, podem conter óleo, surfactantes, hidrocarbonetos e seus contaminantes relacionados, sais inorgânicos além de matéria orgânica. Algumas técnicas convencionais são utilizadas na remoção desses contaminantes, mas nem sempre são capazes de atingir os níveis requeridos de eficiência, principalmente se o efluente se apresentar em forma de emulsão e com diâmetros de gotas inferiores a 10 μm , acarretando um problema ambiental e econômico (COLOMBET *et al.* 2018).

Em geral, as propriedades ou características das águas residuais industriais diferenciam-se largamente de uma indústria para outra, podendo sofrer variações em uma mesma planta, a depender de fatores como a variabilidade da matéria-prima. Dependendo do tipo de operação, o grau de contaminação dentro de uma instalação industrial pode variar entre baixo, médio ou alto e, este último, ocorre em maior probabilidade nas indústrias químicas que, em suas operações, produzem águas residuais com contaminantes orgânicos e inorgânicos solúveis, partículas coloidais e sólidos suspensos (ROCHA e SILVA *et al.* 2018; COLIC *et al.* 2007).

A indústria de produtos de limpeza, por utilizar óleos e gorduras na obtenção de alguns de seus produtos, destacam-se como grandes geradoras de efluentes de vários tipos, entre esses, a mistura água-óleo. Nas últimas décadas, com o crescente apelo em favor do meio ambiente, e o aproveitamento de óleos residuais de fritura (ORF) nas indústrias de produtos de limpeza tem crescido o número de estabelecimentos que recolhem esse material para destinação adequada. Contudo, tais benefícios ambientais para serem concretizados solicitam, dos técnicos responsáveis pelos referidos métodos, cuidados constantes com os efluentes produzidos pelos processos industriais (LINS *et al.* 2017).

O uso do óleo residual de fritura coletado das cozinhas de bares, hotéis, lanchonetes, ou mesmo de ambientes domésticos são armazenados em coletores plásticos. Essa matéria prima obtida por reaproveitamento tem que passar por um tratamento, gerando outro tipo de efluente, originado de lavagens químicas para adequação das matérias graxas ao processo de obtenção dos produtos de limpeza (LINS *et al.* 2017). Durante as coletas de óleos residuais, os

fornecedores arrastam para dentro dos coletores não somente líquidos (óleos e águas), mas também grande quantidade de materiais sólidos. Muitas vezes essas substâncias, estranhas ao processo industrial, requerem uma redefinição de critérios para esse tipo de coleta, com o objetivo de minimizar as dificuldades para o tratamento da água oleosa obtida no final do processo (BRUTON, 2014; ROCHA e SILVA *et al.* 2018). Adicionalmente, os cuidados durante a fase de tratamento do ORF devem ser voltados, prioritariamente, para evitar adição de substâncias que possam aumentar o grau de emulsificação das fases aquosa e oleosa (LINS; BENACHOUR; MOURA, 2018)

Os ORF contidos nos coletores são geralmente descarregados e colocados num tanque de lavagem química. Neste equipamento recebem adições de agentes químicos como HClO_3 , NaCl e NaOH , sob aquecimento e agitação constante. A soda é utilizada para ajustar o pH do meio, enquanto que o hipoclorito e o cloreto de sódio utilizam-se para precipitação do ferro (clarificação) e desestabilização da emulsão água-óleo, respectivamente. Após o tratamento químico, a mistura é deixada em repouso por um certo período de tempo. Em seguida, o material se apresenta separado em três partes: a primeira parte é composta pelo óleo lavado (a qual é enviada para um tanque de clarificação); a segunda parte se encontra constituída por água, óleo e resíduos sólidos e químicos, emulsionados e; a terceira parte é formada por água e óleo residual (HOSNY *et al.* 2016).

Os coletores de ORF precisam ser devolvidos aos pontos de coleta com determinado grau de limpeza, pelos profissionais responsáveis pelo recolhimento dos mesmos. Essa situação sofre um maior agravamento devido à formação de incrustações oleosas (graxas), na parte externa do coletor, solicitando o uso de detergentes no processo de limpeza. As águas oleosas geradas da lavagem química do ORF e, adicionalmente da etapa de lavagem dos tambores de coleta têm seus descartes monitorados por órgãos governamentais (CONAMA, 2005; 2011).

As águas oleosas oriundas do processo de limpeza dos coletores podem ser misturadas e, essa mistura, submetida a um tratamento de recuperação da água e do óleo contidos neste efluente. A água tratada deverá ter características que permitam seu despejo em corpos hídricos, ou reaproveitamento através de retorno a alguma fase do processo industrial. Para isto, escolheu-se modificações da Flotação por Ar Dissolvido (FAD) como técnica de separação água/óleo (HENAUTH *et al.* 2017). A evolução do FAD modificado, ou seja, a pré-saturação do efluente a ser tratado, antes da entrada na câmara de flotação deu origem ao processo de Flotação por Pré-Saturação Induzida (FPSI). Neste caso, as próprias bombas de geração de microbolhas são responsáveis pela alimentação das câmaras de flotação.

Metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma ferramenta estatística útil para design, otimização e análise de experimentos em qualquer processo. Oferece uma grande quantidade de informação a partir de um baixo número de experimentos, pois utiliza de delineamentos especiais que ajudam no aprimoramento do modelo a ser construído (MONTGOMERY, 2005). A MSR pode fornecer os detalhes da interação e dos efeitos quadráticos das variáveis de processo envolvidas no processo e que não podem ser reveladas pelo método convencional de otimização de uma variável (MANOJKUMA; MUTHUKUMARAN; SHARMILA, 2022).

Um delineamento composto central rotacional (DCCR) é o modelo mais popular de uma MSR, para os experimentos, devido às suas vantagens óbvias de rotacionalidade e a capacidade de analisar os efeitos de interação. Inclui três grupos de pontos de delineamento, os fatoriais, que envolve todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (1 e -1); os pontos axiais, que possuem todos os fatores definidos para o zero (0), o ponto médio, com exceção de um fator, que tem o valor de +/- Alpha; os pontos centrais, que são pontos com todos os níveis previstos. O ponto central do delineamento é repetido quatro ou mais vezes para obter uma boa estimativa do erro experimental. De acordo com Myers; Montgomery; Anderson (2009), este procedimento de repetição proporciona uma estimativa da variação adequada da resposta e fornece o número de graus de liberdade necessários para um teste estatístico apropriado do modelo. Delineamentos rotacionais fornecem a propriedade desejável de variância para a predição da(s) constante(s) em todos os pontos que são equidistantes do centro da concepção, melhorando assim a qualidade da predição (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Com base no contexto supracitado, o presente trabalho de pesquisa teve como objetivo geral aplicar a técnica de flotação por pré-saturação induzida (FPSI), escala semi-industrial (SI), na separação água-óleo em uma indústria de produtos de limpeza.

Os objetivos específicos deste trabalho envolveram:

- Acompanhar o processo de geração do efluente industrial a ser tratado e quantificar o teor de óleos e gorduras;
- Conceber e dimensionar o protótipo Cabeça de Série em escala semi-industrial e identificar parâmetros e pontos relevantes de operação para a elaboração de estratégias de experimentos;
- Planejar e aplicar experimentos para interrelacionar parâmetros estatisticamente relevantes e correlacionar tais parâmetros com a eficiência de remoção de óleos e graxas;
- Utilizar a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para validar modelos de previsão para o FPSI; e finalmente

- Avaliar a viabilidade técnica econômica e ambiental de implantação do FPSI pela indústria de produtos de limpeza.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nas próximas Seções do Capítulo 2, encontra-se a fundamentação do presente trabalho de pesquisa. Inicialmente, é realizada uma fundamentação dos principais tópicos relativos a

óleos vegetais, ciclo do óleo residual de fritura e suas características, tecnologias utilizadas na separação água-óleo, planejamento experimental, metodologia de superfície de resposta - MSR, estudo de viabilidade técnica e econômica – EVTE, parâmetros operacionais de flotores, eficiência de remoção de óleos e graxas versus processo de flotação, cinética de flotação. Em seguida, foi feita uma síntese das principais e efetivas contribuições acadêmicas nas respectivas áreas.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inúmeros conceitos consolidados foram levados em consideração nesta pesquisa. Para tanto, foi realizada uma fundamentação teórica acerca dos principais tópicos abordados.

2.1.1 Óleos vegetais

Os óleos vegetais são produtos naturais, insolúveis em água e solúveis em solventes orgânicos, constituídos principalmente por triglicerídeos. Possuem uma grande variedade de aplicações, porém a utilização na culinária, produção de biocombustível e sabão são as que mais se destacam no cenário nacional e internacional (OLIVEIRA *et al.* 2016). Em estabelecimentos comerciais observa-se um percentual elevado da utilização do óleo vegetal para fritura de alimentos. Nestes tipos de comércio podem ser encontradas, com relativa facilidade, fritadeiras com capacidades que variam de 15 a 350 litros de óleo e, nas indústrias esse volume pode chegar a 1.000 litros sem grandes esforços. O tempo de utilização também varia de um estabelecimento para outro, principalmente pela falta de legislação que determine e/ou monitore a troca periódica do óleo usado (LARSEN; WEINSCHUTZ; KOLICHESKI, 2019).

No Brasil, uma parte do óleo vegetal residual, advindo do consumo humano, é destinado a fabricação de sabões. A reciclagem desses resíduos vem ganhando espaço cada vez maior. Algumas cidades brasileiras, como Ribeirão Preto/SP, Curitiba/PR, ABC Paulista/SP, Florianópolis/SC, Porto Alegre/RS e Recife/PE utilizam o óleo residual de fritura para produção de vários produtos, dentre estes o sabão. Porém, a disposição desses resíduos em aterros sanitários e esgotos domésticos é prática comum. A baixa solubilidade dos óleos vegetais na água constitui como um fator negativo, no que se refere à sua degradação em unidades de tratamento de despejos por processos biológicos e, quando presentes em mananciais utilizados para abastecimento público, causam problemas no tratamento da água (PINSKY; KRUGLIANSKAS, 2017).

Estima-se que cerca de 70% dos pedidos de manutenção que a Empresa de Saneamento de Pernambuco (COMPESA) têm recebidos, na região metropolitana de Recife, estão

relacionados ao despejo indiscriminado de óleo de cozinha no sistema de esgoto, causando a sua obstrução, devido ao endurecimento da gordura nos canos. Isso gera elevado gasto econômico, aumentando em até 45% os custos de tratamento para manter o fluxo do sistema de esgoto, mas também ambiental, bem como os impactos sociais, causados principalmente por redes obstruídas que podem proporcionar inundações na cidade durante a estação chuvosa. No Brasil, estima-se que apenas 6,5 milhões de litros por ano sejam coletados e mais de 2,4 milhões de litros de Óleos e Graxas Residuais - OGR sejam descartados indevidamente (LINS; BENACHOUR; MOURA, 2018).

2.1.2 Ciclo do óleo residual de fritura

Há milhares de anos a humanidade descobriu que as gorduras e os óleos poderiam servir para diversas finalidades. Além da importância nutricional, percebeu-se que essas matérias primas poderiam ser utilizadas para conservar alimentos, como por exemplo, as carnes proveniente da caça eram submersas em banha de porco e armazenadas por longo período de tempo (FREIRE; FILHO; FERREIRA, 2013); no processo de fabricação de tintas (Período Renascentista), os óleos vegetais foram usados como base para o desenvolvimento da tinta a óleo (MELLO; OLIVEIRA; SUAREZ, 2013); o óleo de baleia foi usado exaustivamente como iluminação pública e residencial, em alguns estados litorâneos do Brasil, desde o século XVI até meados do século XIX (COMERLATO, 2010).

O aumento da geração de resíduos afeta o cotidiano de milhões de pessoas. Mas a prática da destinação adequada destes resíduos é recente no Brasil, visto que a necessidade de direcionar os resíduos para locais adequados está referenciada na legislação, segundo a PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Um dos principais desafios da PNRS é desabilitar o descarte em lixões (descarte a céu aberto), aterros controlados e recuperar as áreas degradadas por práticas inadequadas de descarte. Algumas medidas paliativas surgem para propor recomendações acerca da utilização do óleo residual de fritura como, por exemplo, a Lei Nº 12.305 de 02 agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto Nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010, onde os municípios ficam responsáveis em prestar serviços que evitem danos à saúde pública e ao meio ambiente. Resíduos de diversas origens eram inadequadamente descartados, acarretando elevação da poluição e degradação ambiental (DOVI *et al.* 2009).

No caso particular dos ORF, em instância federal, há uma carência jurídica somente contornada por algumas legislações estaduais ou municipais. O Estado de São Paulo em 2005 foi pioneiro em criar uma lei específica sobre os ORF, seguido pelo de Rio de Janeiro em 2007,

Minas Gerais em 2009, Paraná em 2010. Em âmbito municipal encontramos vários exemplos de legislação sobre ORF, a maioria no Sul e Sudeste. No Nordeste, especificamente, em Recife temos a Lei municipal nº 18.194/2015, que dispõe sobre a proibição de estabelecimentos comerciais, industriais e prestadores de serviços de descartarem óleos ou gorduras, em geral, no ambiente. O interesse das prefeituras se deve ao fato de que os serviços de saneamento, afetados pela poluição desse material e, o gerenciamento dos resíduos são de competência da municipalidade. Os motivos elencados contribuíram para que alguns municípios legislassem sobre óleos residuais, frequentemente antecipando-se às esferas estaduais e federais (LARSEN; WEINSCHUTZ; KOLICHESKI, 2019).

Apesar de pesquisas já terem demonstrado que um litro de óleo de cozinha quando descartado, indevidamente, para o corpo hídrico contamina cerca de 20.000 litros de água, só agora os ambientalistas concordam que não existe um modelo de descarte ideal do produto, mas sim, alternativas de reaproveitamento desse material, como matéria prima, para a fabricação de outros produtos (FILHO; MIRANDA; SILVA, 2018).

Os resíduos podem se tornar matéria prima de um novo processo de fabricação. Isto quer dizer que mesmo após utilizado, um resíduo pode ser reaproveitado como fonte de energia, insumo ou matéria prima de outro processo. No entanto, é possível citar o óleo vegetal utilizado como óleo comestível que, uma vez utilizado em fritura, gera um resíduo que deve ter destinação ambientalmente adequada. O óleo de cozinha usado, também chamado de óleo residual de fritura – ORF, proveniente de residências, comércio e indústrias é um resíduo potencialmente poluidor quando descartado de maneira inadequada. Depois de utilizado no preparo de refeições, o ORF segue o caminho mais fácil que é o seu descarte na pia da cozinha, por ser mais fácil e rápido. Quando despejado na pia da cozinha, o óleo vai para a rede doméstica de esgoto e entope as tubulações, pois se mistura com o detergente, impedindo a passagem da água. Torna-se também alimento para ratos e baratas em todo o sistema de esgoto. Quando o resíduo chega aos rios, a mortandade dos seres aquáticos aumenta, pois o óleo diminui o oxigênio da água, formando uma película fina oleosa em sua superfície, o que dificulta a troca de gases entre a água e a atmosfera, resultando em morte de peixes e outras criaturas dependentes de tal elemento (LINS; BENACHOUR; MOURA, 2018).

Tendo em vista que as principais atividades alimentícias promovedoras de ORF se encontram nos grandes centros industriais e comerciais, conseqüentemente temos uma demanda elevada desse material para ser tratado e destinado adequadamente, retratando uma realidade comum para os brasileiros. O volume descartado ultrapassa 1,6 bilhão de litros por ano (TAVARES, 2015). Dados da empresa alemã, *Oil World*, especializada em plantas oleaginosas,

mostram que o consumo anual de óleo vegetal comestível por habitante é de cerca de 20 litros. Esse dado indica que para uma população de, aproximadamente, 1.637.834 milhões de habitantes, como a de Recife, serão consumidos, em média, 40 milhões de litros de óleo por ano. Assumindo-se que durante o processo de fritura haja uma perda de 50%, o volume final descartado, por pessoa, será de 10 litros de óleos residual por ano, acarretando um problema de gerenciamento de resíduo oleoso (PINSKY; KRUGLIANSKAS, 2017; IBGE, 2018).

2.1.3 Características do óleo residual de fritura

Na ocasião em que se trata de um produto de uso doméstico e industrial, as suas formas de utilização são as mais variadas. Os produtos que são fritos por óleo são de uma infinidade de tipos e qualidades acarretando, conseqüentemente, alteração em suas características químicas. As mudanças nas propriedades organolépticas do óleo no processo de fritura podem sofrer variações em função do tipo de uso (quantidade de vezes que foi usado para fritura) e origem (proveniente de girassol, soja, canola, milho ou outra oleaginosa), e são percebidas imediatamente quando as reações de degradação começam a ocorrer: mudança na coloração, cheiro, sabor do alimento que foi frito naquele óleo, formação de fumaça, espuma, elevado teor de acidez (devido a formação de ácidos graxos livre), mudança de viscosidade, são algumas alterações observadas. Isso ajuda os estabelecimentos a determinar o momento mais acertado de se promover o descarte do óleo, mas não é o ideal, uma vez que os produtos formados podem apresentar-se, em grandes quantidades, nos estágios muito avançados de degradação, sendo extremamente nocivos à saúde (OSAWA; GONÇALVES; MENDES, 2010; PIKE; O'KEEFE, 2017).

Nos óleos e gorduras existem grande variedade de ácidos graxos livres ou ligados aleatoriamente ao glicerol, o que os tornam uma mistura de compostos químicos bastante complexa. Dessa maneira, suas propriedades físico-químicas sofrem os efeitos das interações de todos esses componentes. O ponto de fusão dos óleos e gorduras, por exemplo, é influenciado pela presença de insaturações (duplas ligações) ou não nas cadeias carbônicas dos triacilglicerídeos (sob forma sólida e em temperatura ambiente são denominados gorduras) e dos ácidos graxos livres. O estado físico do resíduo, além de líquido, pode se apresentar de forma sólida. Dependendo da temperatura do ambiente em que estiver, a solidificação do óleo é natural, sendo seu estado físico diretamente proporcional à temperatura. Estas características também podem influenciar no desempenho do resíduo como matéria prima, por demandar mais energia para alcançar o estado líquido adequado, caso haja necessidade (NELSON; COX, 2012). Diante das possíveis características apresentadas pelo ORF, tratamentos específicos são

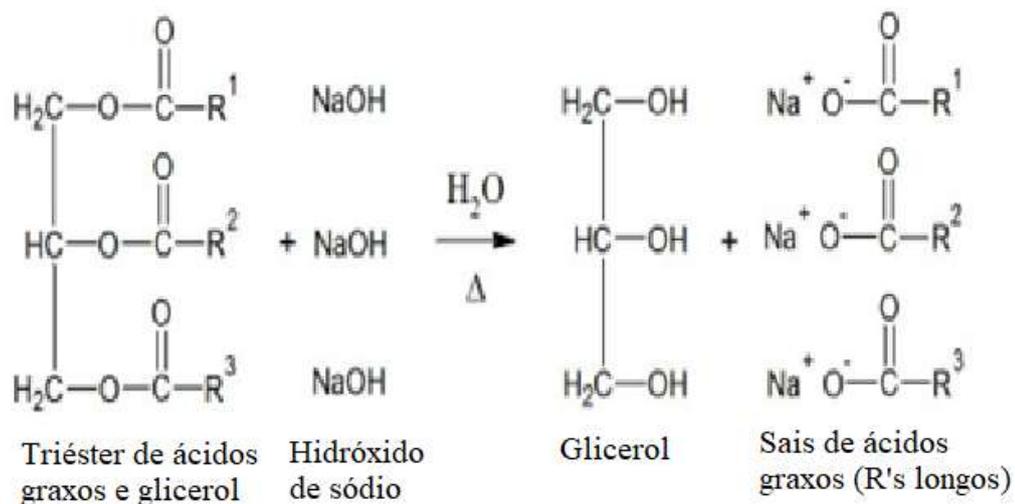
sugeridos para que seja possível utilizá-lo como matéria prima para outro processo industrial (REFAAT, 2010).

2.1.4 Reaproveitamento do óleo de fritura residual na produção de sabão

O ORF se apresenta como rica matéria prima na fabricação de diversos produtos, tais como biodiesel, tintas, óleos para engrenagens, sabão, detergentes, entre outros. Em meados da década de 1990 surgem outros processos químicos com o objetivo de utilizar óleos e gorduras residuais de fritura em processos de reciclagem. Com isso, houve um impulso para a criação de projetos de coleta seletiva desse material, que além de ser uma matéria prima de baixo custo, traria uma redução dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto e incorporaria valores sociais e econômicos às cooperativas e/ou empresas responsáveis pela coleta e transformação desses resíduos. Apesar dos benefícios, os projetos de recolhimento de óleos e gorduras residuais estão espalhados de maneira pontual pelo Brasil e encontram dificuldades para realizar as suas atividades, uma vez que ainda não foram traçadas fortes políticas públicas que incentivem o aproveitamento desse tipo de produto adequadamente (TAVARES, 2015).

Os sabões são produzidos a partir dos óleos pelas reações de saponificação (Figura 1) que é uma reação de neutralização. Essa reação do óleo com solução aquosa de álcali resulta na formação de glicerol e em uma mistura de sais alcalinos de ácidos graxos (sabões). A glicerina pode ser removida ou mantida na composição final, podendo agir como umectante, absorvendo umidade do ar e, como emoliente, tornando a pele mais macia. As bases usadas determinam a consistência do sabão obtido; o KOH e NaOH possibilitam a fabricação de um sabão mole e de um sabão duro, respectivamente. Os radicais R representam cadeias carboxílicas longas (RIBEIRO; SERAVALLI, 2001).

Figura 1 - Reação de saponificação



Fonte: Adaptado de Pike; O'Keefe (2017)

Uma reação de saponificação também se aplica à produção de sabões feitos a partir de resíduos oleosos, no entanto, os óleos e as gorduras residuais contêm partículas e pedaços de alimentos e precisam passar por um pré-tratamento (filtração simples, por exemplo) para retirada desses sólidos, antes de serem transformados em sabões (PIKE; O'KEEFE, 2017).

Por esta razão, tornam-se necessárias algumas etapas de purificação destes óleos. O aquecimento do material para facilitar a filtração da matéria prima e a filtração dos óleos residuais são procedimentos indicados, pois retém os resíduos sólidos oriundos dos processos de fritura. Contudo, considerando a diversidade de condições em que o resíduo pode se encontrar, é necessário identificar o tratamento mais adequado para tratar e obter o sabão (LINS; BENACHOUR; MOURA, 2018).

Na literatura, foram encontradas algumas opções de pré-tratamento, em que houve o beneficiamento do resíduo oleoso usando procedimentos aplicados ao tratamento de efluentes, com a intenção de remover partículas em suspensão e sedimentos oriundos da decomposição térmica dos alimentos e do próprio óleo, retirando compostos que conferem cor e odor ao resíduo. O óleo foi aquecido a 60°C e filtrado a vácuo e depois desodorizado com carvão ativado sob agitação constante a uma temperatura de 110°C (SILVA; PUGET, 2010).

Em outro trabalho, Silva *et al.* (2012) efetuaram somente a filtração dos óleos residuais e utilizaram para isso um tecido tipo gaze para a retirada do material particulado.

Filho *et al.* (2013), além de realizarem a etapa de filtração (cujo tipo não foi informado pelos autores), acondicionaram o óleo por um período de 10 dias, em bombonas de 300 litros, com o objetivo de realizar a decantação de água e partículas e deixar a fase oleosa mais livre de impurezas.

O óleo residual de fritura é um material heterogêneo contendo, além do óleo, gordura hidrogenada, farelo e água, entre outros constituintes. Estima-se que 25% do óleo coletado seja formado por água com impurezas. A recuperação percentual do óleo residual dos alimentos fritos depende em grande parte das operações de lavagem. Considerando que essas operações também são responsáveis pela separação efetiva das fases de resíduos orgânicos e emulsionados, de modo que tenham o menor teor de óleo, enquanto o mesmo pode ser utilizado para produção de sabões e detergentes (LINS *et al.* 2017).

2.1.5 Separação do óleo (matéria-prima) da mistura residual de fritura

Os processos de tratamento a serem adotados, as suas formas construtivas e os materiais a serem empregados são considerados a partir dos seguintes fatores: a legislação ambiental regional; o clima; os custos de investimento e operacionais; a quantidade e a qualidade do lodo gerado na estação de tratamento de efluentes industriais; a qualidade do efluente tratado; a segurança operacional relativa aos vazamentos de produtos químicos utilizados ou dos efluentes; geração de odor; a interação com a vizinhança; confiabilidade para atendimento à legislação ambiental; possibilidade de reuso dos efluentes tratados (WU *et al.* 2018).

Silva *et al.* (2018) relatam que podem ser classificados a presença de óleo em solução aquosa sob quatro formas distintas: livre, disperso, emulsificado e solubilizado. O óleo livre representa as dispersões grosseiras constituídas por gotas com diâmetro superior à 150 μm . Este tipo de dispersão é facilmente removido por meio de processos convencionais de separação gravitacional. O óleo disperso, normalmente com diâmetros de gota entre 50 e 150 μm , também pode ser removido por processos gravitacionais. O óleo emulsificado, possui diâmetro de 5 a 50 μm , podendo ser removido por processos gravitacionais, porém com auxílio de agentes químicos coagulantes e floculantes. Finalmente, o óleo pode também estar solubilizado na água (< 5 μm) sendo extremamente difícil a sua remoção, requerendo o uso de processos químicos especiais tais como, a extração com solventes, e/ou o emprego do tratamento biológico.

Independente da forma como o óleo se apresenta, o descarte ou reinjeção da solução oleosa só é permitido depois que o óleo e os sólidos em suspensão são removidos. As concentrações máximas de óleo e sólidos permitidas nos efluentes depende da legislação de cada país (MIGUEL; FRANCO, 2014).

No Brasil, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 430/2011 (art. 16, I) que complementa e altera a resolução CONAMA 357/2005, informa que:

A água residuária a ser lançada em corpos hídricos receptores apresente valor, em relação aos óleos e graxas presentes, cuja matéria-prima utilizada seja composta por óleos vegetais e/ou gordura animal, máximo igual a 50 mg.L⁻¹ e óleos minerais, com teor máximo de 20 mg.L⁻¹.

Por isso, alguns tratamentos para efluentes oleosos têm sido aplicados mundialmente nas indústrias objetivando o seu descarte ou o reuso da água tratada na própria indústria (HENAUTH, *et al.* 2015).

2.1.5.1 Tratamento físico-químico/primário

As técnicas convencionais de tratamento físico-químico dado ao efluente tem por finalidade obter uma clarificação. O objetivo dessa clarificação é aglutinar as partículas em suspensão (10-100 µm) contidas nas águas residuárias mediante a ação de coagulante e/ou floculante, de maneira a se promover a redução do material coloidal e particulados em suspensão, transferindo-os da fase líquida para a fase sólida, recém formada (DEZOTTI, 2008).

O tratamento físico-químico de um efluente industrial geralmente consiste nas etapas de coagulação e floculação, seguidas de um processo de separação sólido-líquido, que pode ser feito por sedimentação, flotação ou filtração. O tratamento pode ainda ser complementado por um processo de polimento por adsorção com carvão ativado ou adoção de lagoas de estabilização (FERNANDES; ALEXANDRE; SILVA, 2017).

Nos últimos anos, novas tecnologias desenvolvidas para o tratamento de águas oleosas e demais tipos de efluentes despertaram interesse significativo, devido às resoluções mais rigorosas. A literatura relata ampla variedade de processos utilizados para tratar essas águas e efluentes oleosos. Os processos que usam polímeros para tratar a água oleosa empregam três mecanismos principais: floculação, adsorção e complexação. A adição de floculantes de polímeros tem sido extensivamente usada para o tratamento de águas residuais. É um processo simples e eficiente. Fatores como o tipo e dosagem de floculantes, velocidade de mistura, tempo, pH, temperatura e tempo de retenção influenciam a eficiência do processo de clarificação de efluentes. A literatura nos fornece as fases sequenciais para que esse processo de clarificação do efluente se inicie, são estas: quebra ácida, neutralização, coagulação, floculação e sedimentação/decantação (BENETTI, 2008; PAIXÃO; BALABAN, 2018).

- Quebra ácida

Para que ocorra a quebra ácida os efluentes do tipo bruto, com grande porção de óleo emulsificado, se faz necessário uma adição controlada de ácido até que se chegue a um pH de 1,5 - 2,0, em média, associada a uma agitação e um tempo de residência para que esse ácido seja capaz de desestabilizar o complexo emulsionado (BENETTI, 2008).

- Neutralização

O material sólido que se encontra suspenso, são partículas insolúveis na água, que possuem velocidade de sedimentação tão pequena, de modo a inviabilizar sua decantação natural ao longo do tempo. A maioria dessas partículas apresentam sua superfície carregada eletricamente, proveniente da adsorção de íons (OH⁻), principalmente, presentes na água. A presença de cargas elétricas aumenta a repulsão entre as partículas, dificultando a aglomeração e, conseqüente, formação de agregados maiores e de mais fácil sedimentação. O fenômeno de neutralização em si, consiste na eliminação dessas cargas eletrostáticas superficiais (SHAW, 2013).

- Coagulação

A coagulação baseia-se na neutralização das forças que separam os colóides por meio de agentes coagulantes, promovendo a aglomeração das partículas suspensas em flocos maiores, possibilitando sua posterior remoção por processos físicos subsequentes, tais como sedimentação, flotação por ar dissolvido ou filtração (WAN IKHSAN *et al.* 2017; ALMOJJLY *et al.* 2019).

O processo de coagulação é a primeira operação unitária que compõe uma estação de tratamento de água (ETA) convencional (ABDEL-SHAFY; MANSOUR; EL-TOON, 2020). A coagulação pode ser considerada uma etapa crucial no tratamento químico de um efluente industrial, visto que sua eficiência será determinante para o sucesso das demais. Com o efluente em pH ideal, os coagulantes são adicionados com a finalidade de reduzir as forças eletrostáticas de repulsão, que mantêm separadas as partículas em suspensão, para que haja aglutinação destas, facilitando sua remoção. A seleção de um coagulante apropriado para determinado tipo de tratamento deve ser minuciosamente investigada, pois neste se concentra 40% dos custos totais de um tratamento físico-químico (FERNANDES; ALEXANDRE; SILVA, 2017).

Em razão da relevância que a etapa de coagulação tem no processo de tratamento, estudos sobre o comportamento e desempenho dos agentes coagulantes são de suma importância. Existem vários tipos de coagulantes, de origem química e vegetal. Os principais coagulantes químicos inorgânicos utilizados são sais de alumínio e ferro, tais como: sulfato de

alumínio, cloreto férrico, hidroxicloreto de alumínio e sulfato férrico. Podem ser também utilizados os coagulantes de origem orgânico-naturais, sintéticos ou naturais, conhecidos como polieletrólitos, dotados de grandes cadeias com cargas positivas ou negativas. O diferencial entre os coagulantes metálicos e os polieletrólitos catiônicos está na sua reação hidrolítica com a água. Quando os polieletrólitos são adicionados no meio líquido, as cadeias polimerizadas já estão formadas. Já nos coagulantes metálicos, a polimerização inicia-se no contato com o meio líquido, seguido da etapa de adsorção dos colóides existentes no meio (LUFT *et al.* 2019). Os coagulantes mais utilizados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coagulantes mais utilizados

Al₂(SO₄)₃ – Sulfato de alumínio	Cátions polivalentes (Al ³⁺ , Fe ³⁺ , Fe ²⁺ , etc) neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos (Ex.: Al ₂ (OH) ₃), ao absorverem os particulados, geram uma floculação parcial
PAC – Policloreto de alumínio	
FeCl₃ – Cloreto férrico	
FeSO₄ – Sulfato ferroso	
Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio	Usualmente utilizados como agente controladores de pH. Porém, os íons cálcio atuam também como agentes de neutralização das cargas elétricas superficiais, funcionando como um coagulante orgânico

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

- Floculação

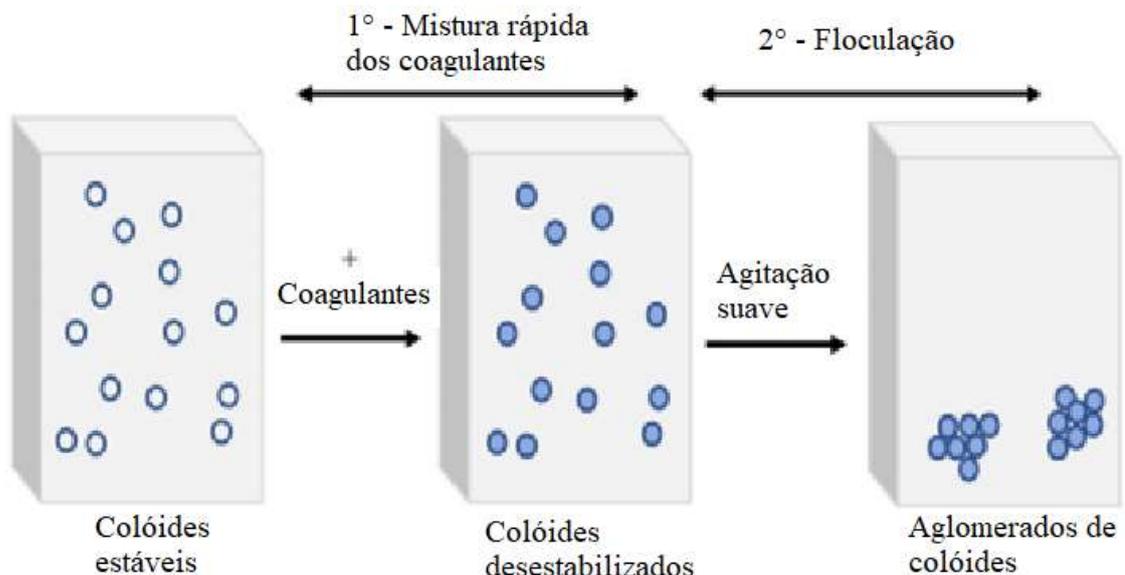
Essa etapa consiste no aumento dos coágulos formados na fase anterior (coagulação), com o auxílio de polímeros, gerando flocos de diâmetros maiores, possibilitando, assim, a agregação de materiais particulados dispersos em um fluido. Nesta fase, colisões e aglomerações ocorrem entre as partículas primárias e flocos com outros flocos. O estágio inicial da aglomeração geralmente ocorre durante a mistura rápida, a velocidade da água deve ser suficiente para promover o contato entre os flocos (LINS; BENACHOUR; MOURA, 2018), as colisões ocorrem através de um mecanismo de transporte de difusão turbulenta, enquanto a mistura está passando lentamente (WATANABE, 2017). Os floculantes mais utilizados são mostrados na Tabela 2. A Figura 2 mostra o processo de coagulação e floculação.

Tabela 2 - Floculantes mais utilizados

Polímeros aniônicos e não aniônicos	Geração de “pontes” entre as partículas já coaguladas e a cadeia do polímero, gerando flocos de maior diâmetro
Polímeros catiônicos	Neutralização as cargas elétricas superficiais que envolvem os sólidos suspensos e incremento do tamanho dos flocos formados (via formação de pontes). Usualmente utilizados no tratamento de lamas orgânicas
Polications	São polieletrólitos catiônicos de baixo peso molecular, os quais possuem como função principal a neutralização das cargas elétricas superficiais e aumento do tamanho dos flocos. Utilizados em substituição aos floculantes inorgânicos convencionais

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

Figura 2 - Mecanismo de coagulação com indicação das duas bem definidas



Fonte: Adaptado de Wan Ikhsan *et al.* (2017)

- Sedimentação

A sedimentação é um fenômeno físico que, em função da sua exposição às leis gravitacionais, permite o movimento de imersão das partículas suspensas em meio líquido, propiciando a clarificação da água. A sedimentação, corresponde a fase em que os flocos, aumentados de tamanho, tendem a decantar. Essa velocidade de decantação será maior quando

o tempo de residência exigido pela água no decantador for menor, ou seja, a velocidade e o tempo de residência são inversamente proporcionais (SILVA, 2012).

Um decantador é uma unidade de separação gravimétrica comum na qual a separação de líquidos imiscíveis ou parcialmente imiscíveis é realizada. Essa técnica é amplamente utilizada em vários processos contínuos, por exemplo, como uma unidade de separação óleo/água, em um processo de tratamento de águas residuais, como uma unidade de separação de biodiesel/água. Existem vários fatores que afetam a eficiência de separação de um decantador, sendo necessária uma diferença de densidade suficiente entre dois líquidos, Parâmetros operacionais como composição da alimentação e taxa de alimentação aproximadamente constantes (CHONWATTANA *et al.* 2018)

Os decantadores são utilizados quando a separação é fácil, ou seja, além de não estarem emulsionados, os líquidos apresentam densidades diferentes e as gotículas são suficientemente grandes para garantir uma velocidade de decantação razoável (PICCININI, 2013).

2.1.6 Tecnologias utilizadas na separação água-óleo

Atualmente existem diversas tecnologias convencionais ou excepcionalmente utilizadas para a separação água-óleo. Dentre esses métodos, destacam-se principalmente a flotação (SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016; WAN IKHSAN *et al.* 2017; KYZAS; MATIS, 2018), a coagulação (WAN IKHSAN *et al.* 2017; KHAN; HISHAM; GHASEMI, 2019), o uso de hidrociclones, o tratamento biológico e as tecnologias de separação por membranas (WAN IKHSAN *et al.* 2017).

As águas residuárias geradas a partir da indústria química, sobretudo de produtos de limpeza são caracterizadas por um elevado teor de compostos orgânicos, além do que a composição dessas águas varia muito, ou seja, esta depende do processo industrial empregado. Existem algumas técnicas utilizadas para separação óleo-água, porém essa metodologia deve ser estudada em função das características do efluente, como por exemplo, a concentração de óleo; tamanho da gota, quantidade e tipo de sólidos suspensos, dentre outros (ELLIS; FISCHER, 1973; EL-GOHARY; TAWFIK; MAHMOUD, 2010).

O tratamento desse tipo de efluente necessita da utilização de um amplo espectro de tecnologias disponíveis. Alguns dos processos físico-químicos mais requisitados para esse fim são: separadores gravitacionais, eletroquímico, filtração por membrana, biológico, adsorção, entre outros. Existem também tecnologias que são baseadas na flotação, processo de separação baseado na diferença das propriedades físico-químicas das interfaces. Dentro do referido

processo existem outros como a eletroflotação, flotação por ar induzido (FAI), flotação por ar dissolvido (FAD) (HENAUTH *et al.* 2017).

2.1.6.1 Separadores gravitacionais

Os separadores gravimétricos, também chamados gravitacionais são utilizados na separação de óleos livres e disperso da água, entretanto esse método se torna pouco eficiente à medida que o tamanho das gotas diminui. Em geral, para se obter uma remoção do óleo emulsificado faz-se uso da tecnologia de flotação, que por sua vez, é auxiliada pela quebra da emulsão através da adição de coagulantes e/ou polímeros flocculantes (ROSA, 2003).

2.1.6.2 Eletroquímico

O método eletroquímico é uma das técnicas, do tratamento de água oleosa, mais eficazes, podendo ser utilizados para desestabilizar a emulsão de óleo em águas residuais através de uma corrente elétrica. Os métodos eletroquímicos mais usuais no tratamento de efluentes oleosos são eletrocoagulação e eletroflotação. Várias tecnologias que envolvem a utilização do eletrodo (a base de ferro, alumínio etc.) são aplicadas para tratamento desses efluentes oleosos oriundos de uma ampla gama de indústrias, sobretudo às químicas. A Tabela 3 mostra, de forma concisa, a eficiência da tecnologia eletroquímica na remoção de poluentes de diferentes fontes de águas residuárias oleosas (JAMALY; GIWA; HASAN, 2015).

Tabela 3 - Eficiência eletroquímica na remoção de poluentes de águas residuárias

Fonte de efluentes	Eficiência de remoção	Referência
Água sintética (contendo óleos e graxas)	93,2% de óleo/graxa	Körbahti; Artut (2010)
Águas residuárias com biodiesel cru	99,36% de óleo/graxa	Ngamlerdpokin <i>et al.</i> (2011)
Resíduos portuários de águas oleosas	80% óleo/graxa	Sekman <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Jamaly; Giwa; Hasan, (2015)

Körbahti; Artut (2010) estudaram a influência das condições operacionais (densidade de corrente e temperatura de reação) no tratamento e purificação de água sintética usando eletrodos de platina-irídio em um reator eletroquímico em batelada. Os seus resultados demonstraram que uma densidade de corrente de 12,8 mA/cm e temperatura de reação de 32°C removeu 93,2% de óleos e graxas, com consumo médio de energia de 33,25 kWh/kg.

Ngamlerdpokin *et al.* (2011) conseguiram remover 99,36% de óleos e graxas de águas residuárias contaminadas com biodiesel cru, tendo um custo energético de 1,78 US\$/m³.

Sekman *et al.* (2011) investigaram a capacidade de eletrocoagulação no tratamento de águas residuárias oleosas geradas a partir de instalações de recepção de resíduos portuários usando eletrodos de alumínio, sendo observada a remoção de 80% de óleos e graxas.

2.1.6.3 Filtração por membrana

As membranas são filmes utilizados para separar, de forma seletiva, um fluido de seus componentes através dos microporos. No processo de separação, a membrana atua como uma camada semipermeável e regula o transporte entre duas fases do efluente. Especificamente, o filtro deixará a água fluir através da membrana, resultando no permeado, enquanto captura sólidos suspensos e outras substâncias, obtendo-se o concentrado (NETO, 2020).

O processo da filtração por membrana é amplamente utilizado para tratamento de águas oleosas. A sua capacidade de remoção de poluentes, nessas águas, tem sido pesquisada exaustivamente. Alguns dos materiais testados para a utilização na fabricação dessas membranas são o fluoreto de polivinilideno (PVDF), polisulfona (OS), poliacrilonitrilo (PAN), bem como, algumas variedades significativas de materiais cerâmicos. A Tabela 4 mostra as eficiências de tratamento obtidas em trabalhos envolvendo o uso de tecnologias de membrana para a remoção de poluentes de fontes de águas residuárias diversas (PADAKI *et al.* 2015).

Tabela 4 - Eficiência de remoção no tratamento por membrana

Fonte de efluentes	Eficiência de remoção	Referência
Emulsão sintética de água oleosa	99% de remoção	Yang; Ma; Yang, (2011)
Emulsão óleo/água preparada com óleo cru de refinaria	93% de remoção	Mittal; Jana; Mohanty, (2011)

Fonte: Jamaly; Giwa; Hasan, (2015)

Yang; Ma; Yang (2011) revestiram a superfície das membranas para tratar águas residuárias oleosas. Estes autores evidenciaram que uma membrana dinâmica composta de caulim/MnO₂ (dióxido de manganês) foi eficaz no tratamento dessas águas, com 99% de remoção.

Mittal; Jana; Mohanty (2011) examinaram uma membrana compósita polimérica cerâmica hidrofílica de baixo custo para o tratamento de águas residuárias oleosas. Os seus resultados demonstraram que 93% de remoção.

2.1.6.4 Biológico

O tratamento de águas residuais oleosas, a partir do metabolismo microbiano para a degradação dos poluentes orgânicos dissolvidos, é denominado de tratamento biológico. Esta técnica é geralmente utilizada quando os métodos físico-químicos não são suficientes para a obtenção de uma boa eficiência no tratamento de efluente. Sendo assim, a utilização dos microrganismos é de grande relevância. Estes são responsáveis pela degradação biológica de águas residuárias, constituídas de matéria orgânica remanescente do tratamento primário, constituída por sólidos em suspensão fina (contendo DBO suspensa ou particulada) e, eventualmente, para remover nutrientes (nitrogênio e fósforo), sendo geralmente empregados no nível secundário de tratamento (JAMALY; GIWA; HASAN, 2015).

O uso de microrganismos para o tratamento de águas residuárias oleosas produziu alguns resultados impressionantes. Em muitos casos, um consórcio de micróbios tem sido usado para remover poluentes em águas residuais oleosas. Embora, o tratamento biológico não seja bem desenvolvido, devido à natureza e comportamento da comunidade microbiana, sob diferentes condições ambientais, atividades resultantes de exaustivas pesquisas nessa área produziram porcentagens notáveis de remoção de contaminantes de efluentes oleosos. A Tabela 5 apresenta alguns dos resultados obtidos a partir da aplicação de tecnologias biológicas no tratamento de efluentes oleosos de diferentes fontes (MATHEWS; GOWRILEKSHMI, 2016).

Tabela 5 - Eficiência na remoção de poluentes por tratamento biológico

Fonte de água residuária oleosa	Eficiência na remoção de poluentes	Referência
---------------------------------	------------------------------------	------------

Águas residuais oleosas sintéticas	96,9% de remoção de óleos/graxas	Songhu; Tong; wu, (2011)
Águas residuais oleosas sintéticas com alto teor de óleos/graxas	48% de remoção de óleos/graxas	Dumore; Mukhopadhyay (2012)

Fonte: Jamaly; Giwa; Hasan, (2015)

2.1.6.4.1 *Biossurfactante*

Os biossurfactantes são compostos obtidos de microrganismos que são capazes de alterar as propriedades superficiais e interfaciais de líquidos. Esses produtos naturais são biodetergentes biodegradáveis com inúmeras aplicações industriais, especialmente em processos que envolvem produtos de petróleo, como o tratamento de solo contaminado com óleo, o tratamento de água oleosa, bem como limpeza de óleo pesado de tubos e tanques de armazenamento (SANTOS *et al.* 2021).

O avanço das tecnologias sustentáveis tem impulsionado a busca por compostos naturais e biodegradáveis para tratar locais contaminados por hidrocarbonetos. Isto levou à descoberta de surfactantes de origem natural, obtidos a partir de organismos vivos, tais como saponinas, produzidas por plantas; sais biliares, produzidos por animais; e glicolípídeos, produzidos por micro-organismos. Todos estes compostos com propriedades surfactantes são denominados biossurfactantes (SOUZA; VESSONNI-PENNA; SOUZA OLIVEIRA, 2014).

A versatilidade de microrganismos, bem como a capacidade intrínseca de seus metabólitos para mediar a transformação de matérias-primas complexas em condições ambientais adversas, tais como: alta salinidade, temperaturas elevadas, valores extremos de pH, pressão e hidrofobicidade, facilita o desenvolvimento destas tecnologias (SILVA *et al.* 2014).

Biossurfactantes, portanto, são moléculas anfipáticas, com porções hidrofóbicas e hidrofílicas que atuam entre fluidos com diferentes polaridades (óleo/água), permitindo acesso aos substratos hidrofóbicos e causando uma redução da tensão superficial, um aumento na área de contato de compostos insolúveis e um aumento da mobilidade, biodisponibilidade e biodegradação de tais substratos (SANTOS *et al.* 2016). Estas características permitem aos biossurfactantes reduzir a tensão superficial e interfacial e formar microemulsões onde os hidrocarbonetos e/ou seus derivados possam solubilizar-se em água ou onde a água possa solubilizar-se em hidrocarbonetos. Tais propriedades possibilitam uma ampla gama de aplicações industriais envolvendo detergência, emulsificação, lubrificação, capacidade

espumante e molhante, solubilização e dispersão de fases (SARUBBO; LUNA; RUFINO, 2015).

Para a obtenção dos biossurfactantes para aplicação em processos de flotação, existe uma infinidade de microrganismos amplamente conhecido na literatura mundial por sua capacidade de produzir tensoativos potentes. Esses microrganismos podem ser cultivados em resíduos industriais insolúveis (resíduos oleosos) e solúveis (carboidratos) em meio aquoso, assim reduzir os custos de produção e do descarte de resíduos industriais no meio ambiente (ALMEIDA *et. al.* 2019).

Os estudos envolvendo o desenvolvimento de sistemas de FPSI-biossurfactantes, para o tratamento de águas oleosas, são pioneiros no Brasil. Há poucos trabalhos reportados utilizando surfactantes biológicos como coletores/coagulantes em processos de flotação por ar dissolvido para o tratamento de águas oleosas (FILHO *et. al.* 2021). A utilização de biossurfactantes associados à FPSI vêm se destacando não somente pelo seu caráter ambientalmente sustentável, mas, principalmente, pelas diversas vantagens apresentadas em comparação aos surfactantes e adsorventes sintéticos, dentre estas, melhor compatibilidade ambiental, biodegradabilidade, toxicidade reduzida (não oferecendo risco aos trabalhadores), especificidade com o complexo microbolhas – gotículas de óleo, e resistência a altas temperaturas, salinidade e pH (FREITAS *et al.* 2016).

2.1.6.5 Adsorção

A adsorção é um processo físico-químico em que há transferência de um determinado elemento ou substância de uma fase líquida para a superfície de uma fase sólida, sem modificação química (CRISPIM, 2009). A adsorção baseia-se no princípio de que uma superfície sólida, em contato com um fluido, tem tendência a acumular uma camada superficial de moléculas de soluto, devido ao desequilíbrio de forças superficiais existentes. Os adsorventes mais utilizados em escala industrial são o carvão ativado, a sílica-gel e a alumina ativada (CAMPOS *et al.* 2012).

2.1.7 Planejamento experimental

O planejamento experimental, também conhecido como *design of experiment* (DOE) é uma abordagem estatística apresentada pela primeira vez pelo estatístico inglês Ronald Aylmer Fisher, na década de 1920. O projeto de experimento é uma abordagem útil para determinar a melhor combinação, de variáveis independentes, que maximiza o desempenho do processo. Além disto, o DOE é um experimento ou série de testes realizados alterando as variáveis do

processo de entrada que podem afetar as respostas de saída. Esta técnica, permite que os usuários determinem as variáveis que têm o efeito mais significativo sobre a resposta. Na verdade, métodos de projeto experimental são ferramentas úteis para melhoramento de sistemas. Além disso, o DOE fornece uma visão completa da interação entre fatores selecionados que podem afetar os resultados ou respostas de saída (ZAHRAEE *et al.* 2013).

2.1.8 Metodologia de superfície de resposta - MSR

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é um método de otimização estatístico, introduzido por Box e Wilson em 1951, que explora a relação entre parâmetros do processo de entrada e variável de resposta (saída) (BOX; WILSON, 1992). A MSR se utiliza de uma ordem sequencial de projeto de experimentos para obter uma resposta ótima. Melhorando e otimizando, desta forma, os parâmetros do processo. A princípio, a MSR foi desenvolvida com o objetivo de determinar situações ótimas de operações em processos químicos. Contudo, agora é utilizada em diferentes campos, sendo aplicada na Engenharia, Física, Ciências biológicas, dentre outras. Na maioria dos problemas, a metodologia de superfície de resposta, para as funções polinomiais são utilizadas para valores aproximados. A MSR envolve etapas como: projetar de um conjunto de experimentos, determinar do modelo matemático com melhor ajuste, encontrar o conjunto ótimo de fatores experimentais para produzir o máximo ou mínimo da resposta (KUMAR; KUMAR; KUMAR, 2020).

2.1.9 Estudo de viabilidade técnica e econômica – EVTE

O tratamento de águas residuais não vem sendo adequadamente adotado pelas indústrias devido ao alto nível exigido para este tipo de tratamento (BRASIL, 2011), dentre estes estão os altos custos de instalação e operacional, grande necessidade de espaço na área próxima da indústria, menos aplicação legislativa do limite de descarga e menor compreensão técnica dos sistemas de tratamento das águas residuais. Devido a isto, alguns países adotaram uma abordagem crítica para a economia de água e controle da poluição da mesma (HAN *et al.* 2019), tornando imperativo, que além das indústrias cumprirem o plano ao projetar e instalar sistemas de tratamento de águas residuais para separar os poluentes da água, reciclar a água e reutilizar (CHEN *et al.* 2020). A Tabela 6 apresenta alguns limites adotados em diferentes locais deste Planeta.

Tabela 6 - Descarte de óleo em águas residuais

Órgãos ou Regulamentos Adotados	Limites de Descarga de Óleos (mg.L⁻¹)	Referência
Convenção de Oslo-Paris (OSPAR) na região do Mar Norte	Limite máximo de 30 mg.L ⁻¹	Dickhout <i>et al.</i> (2017)
Convenção de Paris	Limite superior: mar: 40 mg/L regiões offshore e terrestres: 5 mg.L ⁻¹	Holdich, Cumming e Smith (1998)
Agência de Proteção Ambiental (EPA) nos Estados Unidos	Limite superior 72 mg.L ⁻¹	Tanudjaja <i>et al.</i> (2019)
Departamento de Meio Ambiente, Meio Ambiente Quality Act 1974 na Malásia	Limite de descarga de óleos e graxas: 10 mg.L ⁻¹	Liew <i>et al.</i> (2015)
Governo da China	10 mg.L ⁻¹	Yu, Han e He (2017)
Regulamento Ambiental dos Emirados Árabes	Teor de óleos e graxas em efluentes industriais: 100 mg.L ⁻¹	Tayim e Al-Yazouri (2005)

Adaptado de: Han *et al.* (2019)

O Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) de um produto ou processo é um conjunto de estudos desenvolvidos para avaliação dos benefícios técnicos, econômicos e socioambientais, decorrentes dos investimentos em implantação ou na substituição de produtos ou processos já existentes. A análise de viabilidade econômica tem por objetivo verificar se os benefícios gerados com o investimento compensam os gastos realizados. Dessa forma, os custos envolvidos para implantação, funcionamento e manutenção desses sistemas devem ser detalhados e avaliados de forma minuciosa, a fim de justificar se a execução do investimento foi economicamente viável ou não, e em quanto tempo espera-se um retorno financeiro (DORNELAS, 2005).

2.1.10 Parâmetros econômicos

As técnicas de análise de investimentos existem para facilitar a tomada de decisão ou avaliação relacionada à viabilidade econômica de investimentos (GOFFI *et al.* 2018). Com base em um Fluxo de Caixa (Fc) estão disponíveis os métodos determinísticos para a análise de investimentos, são estes: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* (PB). Tais métodos são apresentados a seguir.

2.1.10.1 Fluxo de caixa (Fc)

Para se realizar um investimento fundamental o conhecimento de todas as entradas e saídas de dinheiro em relação ao mesmo. As análises devem ser consistentes e baseadas em dados os mais precisos possíveis. Para tanto, faz-se necessário a utilização de um método denominado como fluxo de caixa, onde se demonstra todas as movimentações financeiras realizadas pela instituição pela qual o investimento seja realizado (CAMLOFFSKI, 2014). O fluxo de caixa é também um instrumento de planejamento financeiro que tem por objetivo fornecer estimativas da situação do caixa da empresa em determinado período de tempo à frente. É de fundamental importância para a entidade, pois o fluxo de caixa a informa de todas as entradas e saídas de caixa, dando à mesma o conhecimento necessário para poder gastar, investir ou economizar.

2.1.10.2 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido (VPL) também conhecido como valor atual líquido (VAL) é o critério mais recomendado por especialistas em finanças para a decisão de investimento. Este método representa as entradas e saídas de um fluxo de caixa (Fc), tanto positivos como negativos, que ocorrem ao longo da vida do projeto, ou seja, desconta o custo do capital do investimento (GREENHALGH, *et al.* 2017). O valor presente representa o valor de um montante do futuro trazido para o momento atual, conforme Equação (1):

$$VP = \frac{F_{C1}}{(1+i)^1} + \frac{F_{C2}}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_{Cn}}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Em que:

VP – Valor presente de um fluxo de caixa;

n – número de períodos envolvidos em cada elemento da série de receitas e dispêndios do fluxo de caixa;

F_{Cn} – Fluxo de caixa futuro;

i – Taxa mínima de atratividade.

O Valor Presente Líquido (VPL) objetiva determinar um valor no instante considerado inicial, a partir de um fluxo de caixa formado de uma série de receitas e dispêndios (LIMA *et al.* 2015). Este parâmetro corresponde ao somatório algébrico de todos os valores envolvidos nos períodos considerados, reduzidos ao instante considerado inicial ou instante zero, a uma taxa de juros comparativa, representado pela Equação (2):

$$\text{VPL} = -F_{C0} + \frac{F_{C1}}{(1+i)^1} + \frac{F_{C2}}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_{Cn}}{(1+i)^n} \quad (2)$$

Em que:

VPL – valor presente líquido de um fluxo de caixa;

F_{C0} – Fluxo de caixa inicial.

O critério de viabilidade para o investimento, com base no método do VPL pode ser apresentado como:

- Se o VPL foi maior que zero, o investimento deve ser aceito;
- Se o VPL for igual a zero, torna-se indiferente a aceitação ou não do investimento;
- Se o VPL for menor que zero, o investimento não obteve êxito.

2.1.10.3 Taxa interna de retorno (TIR)

Quando se pretende investir, seja num empreendimento, seja numa aplicação financeira, o mesmo é realizado pelo desejo de se receber, em devolução, uma quantia de dinheiro que, em relação à quantia investida, corresponda, no mínimo, à taxa de atratividade, também chamada de expectativa ou taxa de equivalência. De acordo com Lima *et al.* (2015), esse ganho em devolução, comparado à quantia investida, constitui uma parcela percentual chamada de taxa interna de retorno.

A taxa interna de retorno (TIR) corresponde à taxa de juros que torna nulo o valor presente líquido. Logo, situação em que a soma algébrica de receitas e despesas será igual a zero (Equação 3), de modo que:

$$0 = -F_{C0} + \frac{F_{C1}}{(1+i)^1} + \frac{F_{C2}}{(1+i)^2} + \dots + \frac{F_{Cn}}{(1+i)^n} \quad (3)$$

Observe-se que a TIR não é uma medida de lucro, mas serve para que um valor possa ser comparado no tempo. É uma taxa na qual se iguala o valor presente de entrada a um

investimento inicial. A Equação 3 é um critério de seleção de projetos de investimentos com base na avaliação do valor da TIR, o qual pode ter a seguinte interpretação:

- Se a TIR foi maior que a taxa mínima de atratividade, o investimento foi bem sucedido;
- Se a TIR for igual a que a taxa mínima de atratividade, torna-se indiferente o sucesso do investimento;
- Se a TIR for menor que a taxa mínima de atratividade, o investimento não obteve êxito.

2.1.10.4 *Payback*

O prazo de recuperação de investimento, também é conhecido por prazo de retorno ou *payback* (PB). O PB simples apresenta o tempo necessário para recuperar o capital principal sem utilizar taxa de desconto, amortiza-se o VP do empreendimento com as futuras entradas, na data zero. O PB descontado, além de recuperar o capital investido, considera o retorno mínimo exigido pelo investidor, as futuras entradas de caixa são trazidas a VP (SILVA; JANNI, 2021). O PB total considera os fluxos de caixa após a data de recuperação, no intuito de apresentar um prazo de equilíbrio ao longo de todo projeto e pode ser estimado por meio da Equação (4):

$$PB_{TOTAL} = \frac{FC_0}{\frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n}} \cdot t_a \quad (4)$$

Em que:

t_a – Número de tempo em anos.

O *Payback* é também uma ferramenta que indica o prazo necessário para que os fluxos de caixa de entrada coincidam com o custo inicial, podendo ser classificados em duas maneiras, aquele que não considera o custo de Capital da empresa (*payback* simples) e o que considera o custo de Capital da empresa (*payback* descontado). Um longo *payback* representa que os valores investidos serão comprometidos por muitos anos e que os fluxos de caixa são provavelmente mais arriscados.

Neste estudo, o *payback* foi analisado com as seguintes características:

- Range no fluxo de caixa para se aproximar melhor conforme a característica da empresa que apresentar o fluxo aproximado;
- Fixação da quantidade de energia produzida, conforme dados da empresa e estimativas cedidas pelos fabricantes dos equipamentos envolvidos;

- Os índices usados para previsão de investimentos e inflação basearam-se nas previsões do Banco Central conforme relatório econômico de 03/09/2021 (Figura 3). Após 2024, os valores de IPCA (Inflação) e Selic (TMA) foram mantidas constantes e iguais aos valores do ano de 2031.

Figura 3 - Valores previstos para índices econômicos pelo Banco Central em 03/09/2021

BANCO CENTRAL DO BRASIL		Focus Relatório de Mercado				Expectativas de Mercado				3 de setembro de 2021										
Mediana - Agregado																				
	2021				2022				2023				2024							
	Há 4 semanas	Há 1 semana	Hoje semanal	Comp. semanal*	Resp.**	Há 4 semanas	Há 1 semana	Hoje semanal	Comp. semanal*	Resp.**	Há 4 semanas	Há 1 semana	Hoje semanal	Comp. semanal*	Resp.**	Há 4 semanas	Há 1 semana	Hoje semanal	Comp. semanal*	Resp.**
IPCA (%)	6,88	7,27	7,58	▲ (22)	123	3,84	3,95	3,98	▲ (7)	122	3,25	3,25	3,25	▲ (60)	96	3,00	3,00	3,00	▲ (6)	82
IPCA (atualizações últimos 5 dias úteis, %)	6,94	7,46	7,76	▲ (22)	61	3,85	3,92	3,98	▲ (1)	61	3,25	3,25	3,25	▲ (53)	49	3,00	3,00	3,00	▲ (1)	37
PIB (% de crescimento)	5,30	5,22	5,15	▼ (4)	77	2,05	2,00	1,93	▼ (1)	74	2,50	2,50	2,35	▼ (1)	52	2,50	2,50	2,50	▲ (78)	49
Taxa de câmbio - fim de período (R\$/US\$)	5,10	5,15	5,17	▲ (2)	110	5,20	5,20	5,20	▲ (12)	105	5,00	5,05	5,07	▲ (2)	77	5,00	5,00	5,05	▲ (1)	73
Meta Taxa Selic - fim de período (% a.a.)	7,25	7,50	7,63	▲ (1)	118	7,25	7,50	7,75	▲ (1)	117	6,50	6,50	6,50	▲ (23)	92	6,50	6,50	6,50	▲ (19)	86
IGPM (%)	19,31	19,65	19,31	▼ (1)	69	4,86	4,91	5,00	▲ (7)	67	4,00	4,00	4,00	▲ (20)	55	3,78	3,70	3,75	▲ (1)	49
Preços Administrados (%)	10,89	11,31	11,90	▲ (2)	44	4,40	4,50	4,40	▼ (1)	41	3,83	4,00	4,00	▲ (3)	30	3,50	3,50	3,50	▲ (19)	27
Produção Industrial (% de crescimento)	6,47	6,43	6,28	▼ (1)	16	2,20	2,20	2,01	▼ (1)	16	2,68	3,00	3,00	▲ (1)	13	2,50	2,84	2,69	▼ (1)	11
Conta Corrente (US\$ bilhões)	0,00	-1,15	-1,15	▲ (1)	26	-14,00	-15,00	-15,00	▲ (1)	25	-23,00	-25,40	-25,20	▲ (1)	18	-30,00	-30,00	-37,50	▼ (1)	14
Balança Comercial (US\$ bilhões)	69,40	70,00	70,80	▲ (1)	25	62,80	62,00	63,00	▲ (1)	25	60,00	58,10	58,10	▲ (1)	15	55,50	53,90	54,60	▲ (1)	12
Investimento Direto no País (US\$ bilhões)	53,75	54,00	54,00	▲ (3)	26	67,00	65,00	65,00	▲ (1)	25	72,00	70,59	70,09	▼ (1)	16	75,00	75,00	75,00	▲ (4)	13
Dívida Líquida do Setor Público (% do PIB)	61,50	61,30	61,15	▼ (2)	20	63,20	63,20	63,07	▼ (1)	20	65,00	64,95	64,96	▼ (3)	15	66,50	66,50	66,10	▼ (1)	13
Resultado Primário (% do PIB)	-1,90	-1,74	-1,57	▲ (1)	22	-1,35	-1,10	-1,10	▲ (1)	22	-0,70	-0,70	-0,70	▲ (5)	17	-0,30	-0,20	-0,30	▼ (1)	15
Resultado Nominal (% do PIB)	-6,40	-6,20	-6,10	▲ (2)	19	-6,00	-6,30	-6,30	▲ (1)	18	-5,50	-5,75	-5,50	▲ (1)	14	-5,25	-5,40	-5,05	▲ (1)	12

Fonte: Disponível em < <https://www.bcb.gov.br/content/focus/focus/R20210903.pdf> >. Acesso em: 24/10/21

2.2 ESTADO DA ARTE

Nos subtítulos subsequentes, são citadas algumas das contribuições mais relevantes com relação a flotação e os seus processos. É possível de se verificar, a inexistência de um sistema de flotação como o que foi desenvolvido no presente trabalho, sendo esse o grande diferencial da pesquisa desenvolvida.

2.2.1 Evolução histórica do processo de fabricação do sabão

O processo de produção do sabão é uma das reações químicas mais antigas que se tem conhecimento. O início de sua produção remonta a mais de 2.500 a.C., através de escavações realizadas por Arqueólogos na Babilônia. Historiadores relataram terem provas documentadas da existência de práticas semelhantes a produção de sabão no Antigo Egito, remontando essas descobertas a 1.500 a.C. Um Historiador romano (23-79 d.C.), Plínio (O Velho), fez uma descrição sucinta do processo fabril dos sabões duro e mole. Em que o sabão duro consistia na saponificação com o hidróxido de sódio (NaOH), no qual a reação ocorrerá com os sais sódicos, e o sabão mole a reação de saponificação acontece por meio do hidróxido de potássio (KOH) na qual a reação irá ocorrer na presença dos sais de potássio e ácidos graxos. Há relatos que a

fabricação do sabão exigia mais paciência do que perícia, pois o que tinha a se fazer era misturar dois ingredientes: cinza vegetal (substância rica em carbonato de potássio) e gordura animal e esperar até que estes reagissem entre si (BORSATO; MOREIRA; GALÃO; 2004).

No século IX o sabão começou a ser comercializado como produto de consumo na Europa, mas só a partir do século XIII a quantidade produzida passa a ser compatível com uma produção industrial. Até o início do século XIX pensou-se que o sabão fosse uma mistura mecânica de gordura e álcali. Foi então que o químico francês Michel-Eugène Chevreul (1786-1889) apresentou essa mistura como, na verdade, uma reação química. No Brasil, os sabões começaram a ser fabricados em fazendas utilizando como matéria prima, o sebo e a banha de porco. As regiões Sudeste e Nordeste, principalmente, abrigavam as indústrias de óleos vegetais objetivando o aproveitamento dos subprodutos das indústrias algodoeiras. Com isso estabeleceu-se a primeira fase da evolução da indústria saboeira nacional, tendo sua segunda fase iniciado em 1960, quando houve a importação da primeira extrusora do Brasil (BARBOSA; SILVA, 1995).

O sabão é uma base de hidróxido de sódio (NaOH) ou potássio (KOH) da reação de hidrólise natural ou básica de óleos ou gorduras (BETSY *et al.* 2013). O sabão é talvez o mais antigo detergente conhecido pelos seres humanos. Por suas propriedades químicas como agente de superfície aniônica, e a presença de ácidos graxos como: ácido láurico, esteárico, palmítico e oleico contribuem para as propriedades de limpeza e lavagem deste (ONYANGO *et al.* 2014).

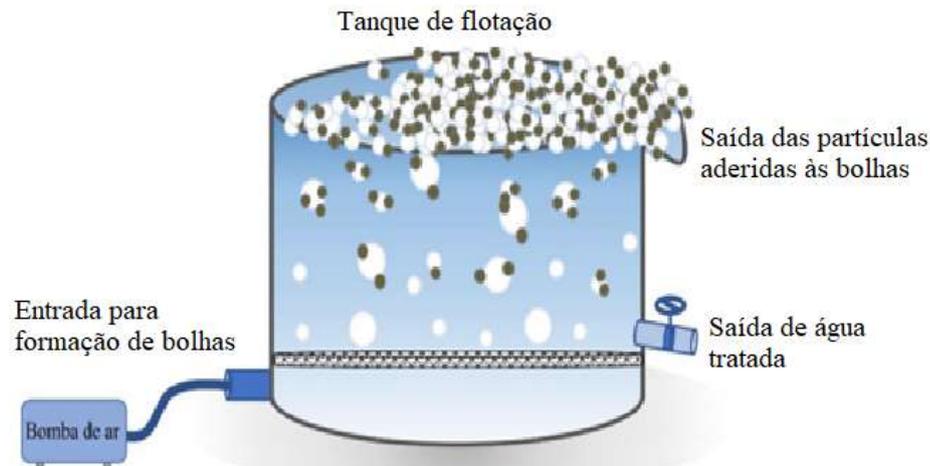
2.2.2 Flotação

A flotação teve início no processamento mineral visando à separação de determinadas partículas minerais de elevado valor econômico. No que diz respeito à técnica utilizada para o tratamento de águas residuárias e de esgoto doméstico, a flotação por ar dissolvido (FAD) vem se destacando pela grande aplicabilidade do processo na remoção de sólidos, material orgânico, espessamento de lodo biológico, entre outros. Atualmente, é um processo extremamente importante quando o assunto é a remoção de óleos emulsificados de efluentes oriundos da indústria química, conforme descrito na literatura por diversas pesquisas sobre flotação, sua modificação e aplicações de vários tipos, como a flotação por ar induzido (FAI) e flotação por ar dissolvido (FAD) tem sido consideradas (WANG; HUNG; SHAMMAS, 2010; HENAUTH *et al.* 2015).

Essa tecnologia é baseada na suspensão de pequenas partículas de materiais distintos sobre a água, promovida por diferentes métodos de formação de bolhas de ar e envolvendo a adição de agentes químicos de flotação, com posterior remoção das partículas aderidas às bolhas

de ar que sobem à superfície (WAN IKHSAN *et al.* 2017; KYZAS; MATIS, 2018). Dessa forma, esse método tem melhor eficiência na remoção de partículas menores e mais leves (SATHTHASIVAM; LOGANATHAN; SARP, 2016). Um esquema simplificado de um sistema de flotação pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema simplificado de um processo de flotação



Fonte: Neto apud Wu *et al.* (2018)

A flotação é um processo que apresenta inúmeras vantagens, principalmente na eficiência de remoção de matéria orgânica do sistema. Na técnica de flotação, a escolha de uma vazão adequada de ar é necessária para promover uma maior eficiência de remoção de sólidos. Uma interação eficaz entre as bolhas de ar e as partículas induz a incorporação de ar dentro dos flocos de forma que esses flocos possuem uma menor densidade, principal fator pelo qual esses flocos tendem a flotação. Os flocos “compactos” que são formados quando a interação entre os flocos e as bolhas de ar é insuficiente, ao se estabilizarem, tendem à sedimentação por serem mais densos que a água (DHANARAJANA *et al.* 2018).

O tamanho e quantidade de bolhas de ar geradas são fundamentais para o bom desempenho do processo. Bolhas muito grandes causam turbulência no meio, impedindo o contato dessas com as partículas. De forma ideal, as bolhas de ar e as partículas devem ter tamanhos semelhantes, variando entre 10 e 1000 micra. Abaixo de 10 micra a flotação é muito lenta e, pela hidrodinâmica do líquido, o contato entre bolhas e partículas é mais difícil. Acima de 1000 micra, as bolhas são grandes e causam turbulência no líquido. Sistemas de aeração inadequados comprometem o desempenho de toda a unidade de flotação, consistindo em uma das deficiências mais usualmente observadas nas unidades de flotação existentes (FILHO; MIRANDA; SILVA, 2018).

No método da flotação, partículas hidrofóbicas são seletivamente adsorvidas na superfície da bolha de gás, neste caso o ar, e arrastadas até a superfície onde são concentradas e assim removidas juntamente com a espuma. Diferentes sistemas de flotação podem variar de acordo com os utensílios e agentes envolvidos no processo. Nessa situação, os processos de flotação mais utilizados em águas residuais oleosas são a flotação por ar dissolvido (FAD), flotação por ar induzido (FAI) (ALMOJJLY *et al.* 2019; LEE *et al.* 2020) e flotação por pré-saturação induzida (FPSI) (SANTOS *et al.* 2021).

2.2.2.1 Flotação por ar dissolvido (FAD)

A flotação por ar dissolvido (FAD) é reconhecidamente um método de separação de partículas que despontou no século XX, desde então, tem sido aplicada em ramos dos mais diversificados no que diz respeito a área de tratamento de efluentes industriais. Inúmeras aplicações da FAD têm sido relatadas, principalmente, quando o tratamento é para a remoção de compostos orgânicos, íons, microrganismos, óleos, graxas e corantes, remoção de odor e matéria suspenso, esgoto doméstico, dentre outras. A flotação por ar dissolvido é um processo alternativo para a separação sólido-líquido e líquido-líquido em que as partículas são removidas através da agregação a bolhas de ar (HENAUTH *et al.* 2015; ROCHA e SILVA *et al.* 2018).

Na tecnologia de tratamento de efluente FAD, o gás é dissolvido na água sob determinada pressão em um saturador. A água, uma vez saturada com ar, é injetada no tanque juntamente com o efluente que se quer tratar através de dispositivos constritores de fluxo, conhecidos por válvula agulha, Venturi, placa de orifício à pressão atmosférica. A queda da pressão no fluxo da água saturada faz com que a água fique supersaturada e o ar excedente passa a ser liberado sob a forma de microbolhas de gás que irão se aderir às partículas ou, mais precisamente, às gotículas em suspensão e promover a flotação à superfície. O tamanho das microbolhas geradas, nesse processo, assume um tamanho de 10 a 100 μm (HUBER *et al.* 2011; SHAMMAS; WANG, 2016).

Oliveira *et al.* (2017) reportaram dados da operação em escala real de uma planta de FAD que gera microbolhas a partir de uma bomba centrífuga multifásica, sem uso de saturador ou vaso de pressão, e com tempos de saturação de 5-10 segundos, a pressões de 400-600 kPa. A referida bomba possibilitou a geração de microbolhas com diâmetro médio próximo a 40 μm (5,5 bar).

Os itens fundamentais em um sistema FAD são a bomba de pressurização, o sistema de injeção de ar, tanque de saturação, válvula de despressurização, sistema de adição de reagentes e o tanque ou célula de flotação propriamente dita. Na FAD, algumas etapas são de grande valia

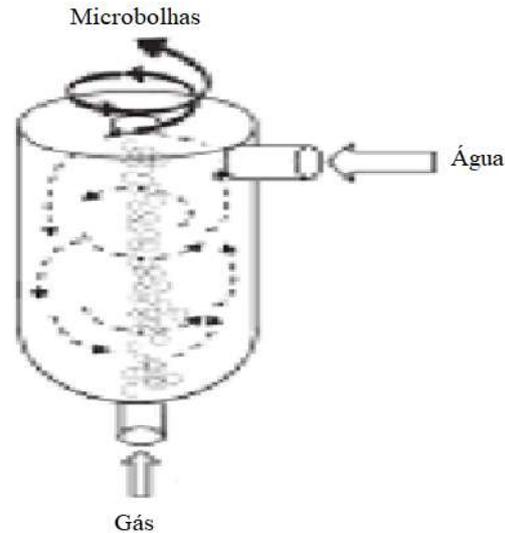
e determinam a eficiência do processo de tratamento de efluente, são estas: a dissolução do ar na água, a redução da pressão da água com decorrente formação das microbolhas de gás e a adesão bolha-partícula (HENAUTH *et al.* 2017).

Os sistemas de FAD podem ser classificados de acordo com o método de dissolução do ar utilizados em sistemas de compressão total do efluente (todo fluxo de alimentação é submetido à pressão) tendo como vantagem a solicitação de menores pressões, pois a probabilidade para a adesão bolha-gota é máxima nessas condições e desvantagem a compressão e o bombeamento, o que pode levar a uma emulsificação do óleo; sistemas de compressibilidade parcial do efluente, e sistema de compressão do reciclo de parte do efluente clarificado (PAINMANAKUL *et al.* 2010).

2.2.2.2 Flotação por ar induzido (FAI)

Nos processos de flotação por ar induzido (FAI), as bolhas de gás podem ser introduzidas no efluente por métodos mecânicos ou hidráulicos. Na FAI de base mecânica, o gás é introduzido na água por redemoinhos de fluxo criados por um impulsor mecânico. As unidades hidráulicas, por outro lado, usam um dispositivo redutor para arrastar o gás para a água e têm menos peças móveis do que as unidades mecânicas. Normalmente, as bolhas de gás geradas por este método têm um diâmetro na faixa de 100-1000 μm . Uma ilustração de FAI é dada na Figura 5 (HERNÁNDEZ, 2021).

Figura 5 - Desenho esquemático do processo de geração de microbolhas através da FAI



Fonte: Li; Tsuge, (2006)

A determinação dos parâmetros hidrodinâmicos da bolha (diâmetro, velocidade de subida, frequência de formação e área interfacial da bolha) podem ser obtidos com diferentes difusores de gás. Além disso, a condição de mistura química em termos de gradiente de velocidade associada aos diferentes fenômenos de geração de bolhas deve ser levada em consideração, a fim de focar bem na relação entre eficiência de tratamento e hidrodinâmica de bolhas no processo de FAI (PAINMANAKUL *et al.* 2010).

Foram comprovados dados de eficiência de remoção, obtidos com a FAI na faixa de 60 – 80% maiores quando comparadas a outros processos de separação. Esses resultados possibilitaram a confirmação de que as bolhas geradas ao entrar em contato com as gotas de óleo, agem como “para-quedas ascendentes”, sendo recolhidas na parte superior do flotador. A eficiência máxima de 80% foi alcançada para tempos de retenção de 30 minutos, no entanto quando esse tempo foi aumentado a remoção sofreu uma queda significativa, inferior a 40% (PAINMANAKUL *et al.* 2010).

2.2.2.3 Flotação por ar dissolvido *versus* flotação por ar induzido

Os dois principais métodos da flotação: FAD e FAI, diferem fundamentalmente na forma de geração de bolhas de gás, levando também a diferenças em seus tamanhos, condições de mistura, taxa de carregamento hidráulico e tempos de retenção. Uma comparação dos métodos é resumida na Tabela 7 abaixo (HERNÁNDEZ, 2021).

Tabela 7 - Comparação entre sistemas FAD e FAI

Parâmetro	FAD	FAI
Tamanho da bolha	10-100 μm	100-1000 μm
Método de geração	Pressão, saturação e despressurização	Velocidade, arrastamento e dispersão
Condições operacionais	geralmente de uma única célula	configuração multicelular
Tempo de retenção	5-15 min	< 5 min
Estrutura	grande	compacta
Investimento	alto (tanque grande e sistema de saturação)	baixo

Fonte: Adaptado de Hernández, (2021)

Durante a FAI, as bolhas de ar são geralmente total ou parcialmente encapsuladas por gotas de óleo. Em contraste, durante a FAD, as bolhas de ar são nucleadas na superfície ou dentro das gotículas de óleo e crescem até um tamanho suficiente para ajudar na separação. Esse processo ocorre se a pressão parcial for menor na fase gasosa do que na fase líquida. É importante observar que o ar deve ser liberado da solução de forma precisa, sendo necessária também uma queda de pressão na entrada (EFTEKHARDADKHAH *et al.* 2015).

2.3 PARÂMETROS OPERACIONAIS DE FLOTADORES

Embora os princípios básicos do funcionamento de flotadores sejam simples, estes dependem de um cuidadoso controle dos parâmetros de projeto, determinados em função das características do efluente a ser tratado. Logo, no início do processo, os primeiros parâmetros a serem definidos são de coagulação e/ou floculação, tais como: pH, gradiente de velocidade, tempo de retenção, dosagem dos coagulantes e grau de agitação da floculação. Em seguida, é necessário definir o tempo de retenção no tanque de flotação, os tamanhos das microbolhas, a taxa de recirculação do líquido pressurizado com ar, pressão da câmara de saturação e quantidade de ar fornecida em relação à massa de sólidos em suspensão no líquido (SILVESTRE, 2018).

Num processo de flotação por ar dissolvido (FAD) geram-se bolhas de um gás muito pequenas, reduzindo a pressão sobre uma corrente de água residuária que foi exposta a pressões superiores à atmosférica. Quando a pressão é reduzida, à medida que o líquido flui através de uma válvula de redução de pressão, para uma câmara de flotação, pequenas bolhas nucleam-se a partir da solução supersaturada, se ligam e ficam aprisionadas por óleo e partículas sólidas

(poeira) e sobem para a superfície onde são removidas. Embora o ar seja o gás mais comum usado neste processo, o metano, o nitrogênio e o dióxido de carbono também podem ser usados (LAKGHOMI; LAWRYSHYN; HOFMANN, 2015). Existem dois métodos para gerar bolhas de ar no processo de FAD. Num primeiro o ar é dissolvido no líquido tratado sob pressão de até 600 kPa. Num segundo processo as águas residuárias são arejadas, com auxílio de impulsores, até que estejam saturadas (Flotação por Ar Induzido - FAI) (RADZUAN; BELOPE; THORPE, 2016).

Ao longo dos últimos anos, tem havido melhorias no projeto e especificação da flotação, com o objetivo de melhorar o tratamento da água (RADZUAN; BELOPE; THORPE, 2016). O projeto do sistema de Flotação por Pré-Saturação Induzida (FPSI) depende de fatores como o tipo e volume das águas residuais, o grau e a natureza dos contaminantes, pressão apropriada, vazão, tempo de retenção, taxa de reciclagem, tipo de coagulante e dosagem antecipada para o tratamento. Apesar da ampla aceitação e aplicação industrial da tecnologia iminente do FPSI, algumas questões relacionadas à otimização e funcionalidade permanecem em pesquisas constante.

Os tanques de flotação podem ser confeccionados em duas formas básicas: circular e retangular. A partir da revisão dos autores da literatura e anúncios de fabricantes, a primeira parece ser mais popular. Krofta; Wang (2000) (fabricante de equipamento) concordam que o desenho circular deve ser selecionado como primeira escolha. As vantagens do formato circular incluem:

- Construção econômica;
- Baixas velocidades mantidas em toda a zona de flotação ativa;
- Coletores de espuma com braço articulado reduz requisitos de manutenção e lubrificação;
- Raspadores inferiores podem ser inseridos a pouco custo adicional;
- Eixo de comando superior montado centralmente elimina pinhões, correntes e;

As vantagens da câmara de flotação retangular incluem:

- Conservação do espaço em áreas congestionadas;
- A maioria dos tamanhos padrão pode ser enviada montada, facilitando assim a montagem em campo;
- O fundo das câmaras em forma de cone elimina a necessidade de raspador inferior.

De Renzo (1981), quanto mais uniforme é a distribuição da água e das microbolhas, menor será a unidade de flotação. Geralmente, a profundidade das unidades de flotação efetivas está entre 4 e 9 pés (1,2 m a 2,7 m). A forma básica pode ser redonda, quadrada ou retangular. Beychock (1967) sugere que profundidades de 6 a 8 pés (1,8 m a 2,4 m) devam ser empregadas. No caso de câmaras retangulares é aconselhável instalar uma chincana orientadora de fluxos com um ângulo de inclinação de 60° em relação à horizontal e 30 a 50 cm de comprimento. A largura da câmara, depende do tipo de equipamento utilizado para raspar o material flutuante, raramente ultrapassa os 8 metros. O comprimento pode variar entre 4 e 12 metros (SAINZ-SASTRE, 2007). Os tanques de flotação retangulares devem ser construídos com varredores de corrente, de modo a extrair espumas. No caso dos tanques circulares, os braços do *skimmer* são radiais. Para ajustar a velocidade de rotação ou deslocamento do sistema de arrasto, deve-se ter disponível um mecanismo de acionamento de velocidade variável.

Algumas recomendações gerais de projeto são (SAINZ-SASTRE, 2007):

- O diâmetro máximo do tanque de flotação deve ser em torno de 10 m;
- Os tanques de flotação devem ter raspadores de fundo;
- O sistema de acionamento de raspadores deve ter um mecanismo de acionamento de velocidade variável. Uma velocidade alta pode causar ruptura da espuma formada e o retorno de flocos para a água, com uma perda correspondente de desempenho;
- A concentração normal de espumas está numa ordem de grandeza entre 3-3,5%, sendo que esta concentração pode aumentar através do uso de polieletrólitos;
- A manutenção de um nível constante de água dentro do tanque de pressurização é essencial para garantir o tempo de contato, para tal fim uma válvula de flutuação ou qualquer outro sistema deverá ser usado;
- A câmara de pressurização deve ter pelo menos: válvula de segurança, controle de nível, purga e manômetro;
- É importante que o equipamento funcione de forma contínua, uma vez que no *start up* as condições de ar têm de ser configuradas;
- No sistema de despressurização, têm-se de ser obtidas bolhas de tamanho muito pequeno, de modo que para a mesma quantidade de ar é formada mais quantidade de microbolhas e, portanto, mais flocos são capturados;
- Microbolhas maiores quebram mais fácil e este modo de operação leva a velocidades de flutuação baixas.

São considerados parâmetros recomendados para controlar a eficiência do processo (GARCÍA-MARTÍNEZ; PÉREZ-SANCHES; RANCAÑO-PÉREZ, 2012):

- Concentração de sólidos em afluentes e efluentes;
- Turbidez de efluentes;
- Observação do tipo de bolha;
- Concentração de borra oleosa removida pelos raspadores;
- Velocidade de avanço dos *Skimmers*;
- Verificação dos equipamentos de pressurização, de pressão e de fluxo.

Segundo García-Martínez, Pérez-Sanches e Rancaño-Pérez (2012), as atividades de manutenção e controle envolvem:

- Verificação da ponte através da operação de arranque, parada e interrupção de segurança;
- Inspeção da operação do motor de engrenagem eletromecânica central (se for um tanque circular);
- Níveis de lubrificação;
- Avaliação de sobreaquecimento de ruídos, vibrações e compressores;
- Verificar o funcionamento das bombas de pressurização;
- Verificar a pressão e o fluxo no equipamento de pressurização;
- Analisar o agitador do tanque de homogeneização do lodo espessado e verificar o bombeamento das borras oleosas espessadas e;
- Verificar os excessos e o espessamento das borras.

2.4 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO OLEOSA VS. PROCESSOS DE FLOTAÇÃO

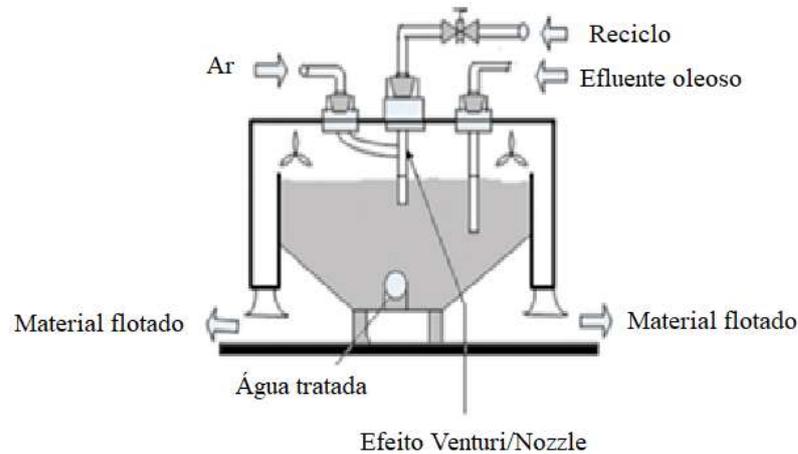
Na presente Seção, temos elencados os principais tipos de modificações ocorridas nos sistemas de flotação para remoção de óleos e graxas.

2.4.1 Flotação *nozzle*

Neste sistema, o efluente tratado é parcialmente reciclado por uma bomba centrífuga fazendo-o passar por uma constrição (edutor), onde o gás é misturado na água para formação das bolhas (efeito *venturi*), as quais colidem e aderem-se à fase em suspensão para formarem

os agregados bolha de ar-gotícula de óleo que, posteriormente, ascendem à superfície (KUNDUA; MISHRA, 2019). A Figura 6 mostra um sistema de flotação *nozzle*.

Figura 6 - Flotador *nozzle*



Fonte: Adaptado de Kundua; Mishra, (2019)

Bennetti (2009) reporta que as principais vantagens da flotação *nozzle* sobre os sistemas de flotação por ar induzido (FAI) convencionais são o menor consumo de energia, pois não necessita de impulsor, requer menores custos de manutenção e tem maior vida útil, devido à ausência de partes móveis. Gopalratnam, Bennetti e Peters (1988) fizeram estudos de remoção simultânea de óleo e metais pesados de efluentes industriais com unidades de flotação *nozzle*. Esses autores reportam concentrações residuais de óleo e porcentagem de remoção por flotação no efluente tratado da ordem de 36 mg.L^{-1} e 86%, respectivamente.

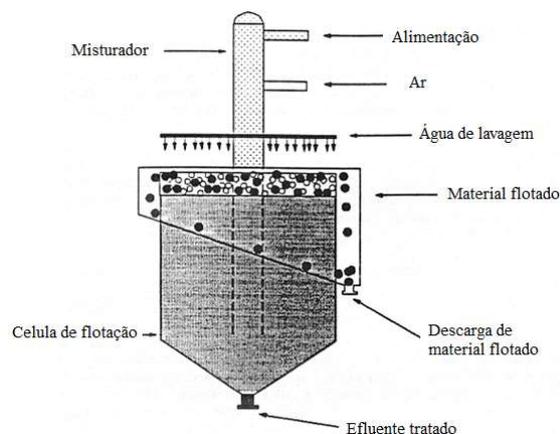
2.4.2 Flotação Jameson

Esta célula é aplicada na área de tratamento de efluentes líquidos, na purificação de eletrólitos de plantas de extração por solventes e eletrodeposição. Neste sistema, o ar e a solução aquosa contendo o produto orgânico são misturados no topo de um tubo vertical, chamado de tubo de descida, onde se encontra o autoaspirador tipo venturi. A mistura cai em concorrente, descarregando num tanque-reator aberto, chamado de zona de separação, lugar onde o material agregado ar-gotículas (oriundas de produtos orgânicos) ascendem à superfície onde são purgados em intervalos regulares de tempo, enquanto a solução aquosa tratada é descarregada de forma contínua na parte inferior (SANTANA *et al.* 2008).

Os resultados dos estudos reportados por Readett e Clayton (1993), mostram que a célula de flotação Jameson em dois estágios é capaz de remover, ou melhor dizendo, recuperar 92% do produto orgânico do eletrólito da planta de extração por solventes e eletrodeposição.

As suas principais vantagens em relação aos outros sistemas por ar induzido são que opera de forma estável com altas razões de ar/líquido (60 a 70% em volume), melhor cinética de coleta, pelo contato forçado das gotas de óleo em um meio de alta densidade de bolhas e tempo de residência curto (10-15 segundos - tubo de descida e menor de que 2 minutos - tanque reator aberto). Em função disto, o tamanho do equipamento requerido é menor. A Figura 7 mostra um esquema da flotação tipo Jameson.

Figura 7 - Flotador tipo Jameson



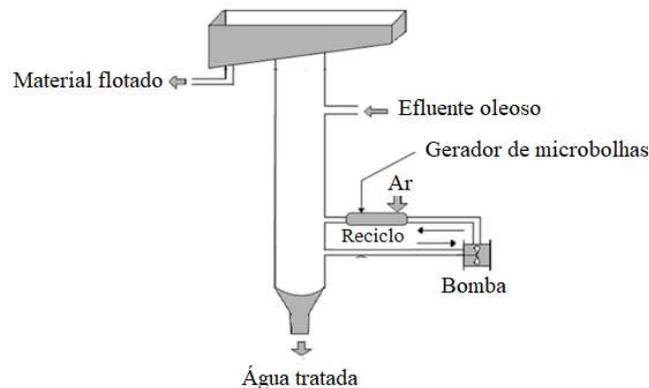
Fonte: Adaptado de Harbort; Jackson; Manlapig (1994)

Santander (1998) estudou a separação de óleos emulsificados por flotação Jameson. O pesquisador desenvolveu um sistema de flotação Jameson modificado, baseado na otimização das condições hidrodinâmicas da floculação/coalescência e minimizando problemas de curto-circuito. A eficiência deste novo processo é da ordem de 97%, com capacidade de tratamento de $592 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{dia}$. Segundo o autor, devido à simplicidade de seu design, este sistema apresenta um grande potencial para o tratamento de efluentes oleosos.

2.4.3 Flotação em coluna

A coluna de flotação utiliza dispersões de bolhas com 100 a 400 μm de diâmetro geradas por um equipamento chamado *sparger*. Este consiste em um misturador estático em linha e uma bomba centrífuga. O efluente tratado é recirculado da base da coluna e introduzido no misturador estático, onde o gás injetado e o líquido são misturados em condições altamente cisalhantes resultando na dispersão de bolhas. A mistura ar-líquido é introduzida próximo a base da coluna. O tamanho de bolha é controlado pela velocidade do fluxo através do *sparger*, vazão de gás e concentração de tensoativo (KUNDUA; MISHRA, 2019). A Figura 8 mostra um exemplo de flotador em coluna.

Figura 8 - Flotador em coluna



Fonte: Adaptado de Kundua; Mishra, (2019)

Em estudos piloto realizados por Gebhardt, Mankosa e Hubred (1994), utilizando uma coluna de aço de 20,3 cm de diâmetro por 4,5 m de altura no tratamento de águas oleosas com diâmetro médio de gotas de óleo entre 10 e 15 μm , a remoção de óleo ficou na faixa entre 80 a 98%, dependendo da concentração de alimentação e das condições de operação (velocidade superficial de alimentação, aeração e dosagem de coletor). Para baixas concentrações de óleo na alimentação (73 mg.L^{-1}), a concentração de óleo na descarga ficou em 13 mg.L^{-1} e para concentrações de alimentação de 541 mg.L^{-1} , a concentração residual foi de 41 mg.L^{-1} , cerca de 92% de remoção.

Estudos de separação óleo/água, realizados com uma coluna de flotação, mostraram que, utilizando um sistema de floculação, onde há injeção de ar e passagem do fluxo através de um misturador estático, é possível remover até 98% do óleo contido em água oleosa com concentrações iniciais de 150 mg.L^{-1} (ROSA *et al.* 1999).

2.4.4 Flotação *air sparged hydrocyclone* - ASH

Na flotação ASH (*Air Sparged Hydrocyclone*), o efluente é alimentado tangencialmente através do cabeçal de ciclone convencional dentro do tubo poroso, o qual desenvolve um fluxo em redemoinho de certa espessura na direção radial. A alta velocidade do fluxo cisalha o ar injetado pela parede do tubo poroso em pequenas bolhas que, deslocam-se rapidamente para a parte central do cilindro. As partículas colidem com essas bolhas e, após aderirem, são transportadas radialmente para espuma formada na região axial. A espuma formada é suportada pelo pedestal e move-se verticalmente ao longo do eixo do ciclone na direção do tubo de saída superior, sendo descarregado. A água oleosa tratada é descarregada pelo fundo através de uma abertura anelar situada entre a parede do tubo e o pedestal. Nos últimos anos, a flotação ASH

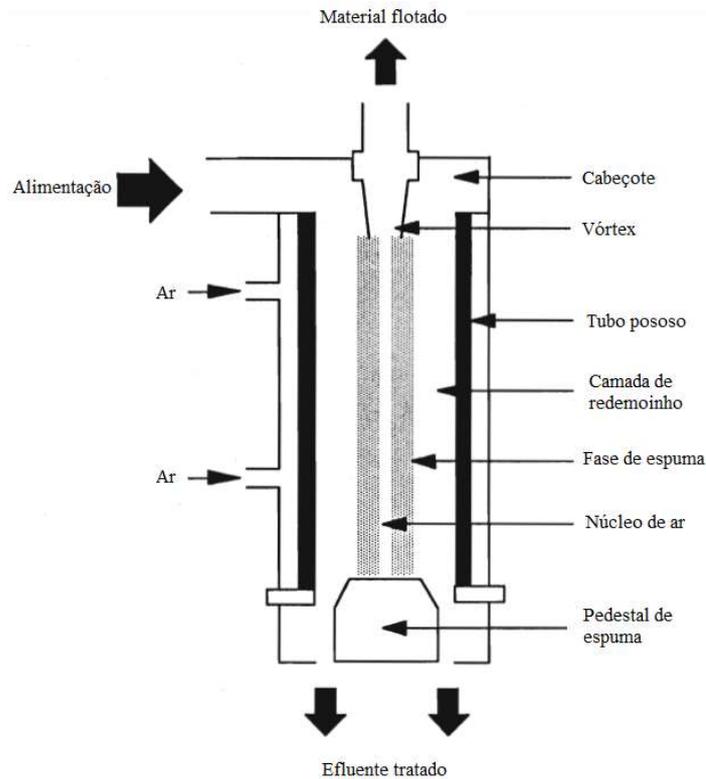
tem sido objeto de pesquisa em vários campos além da indústria mineral, tais como a indústria do papel, alimentícia, petroquímica etc. A alta capacidade de processamento do ASH, de 100 a 300 vezes a capacidade de uma célula de flotação convencional, deve-se ao curto tempo de residência, menos de um segundo em um sistema de 2 polegadas (5,08 cm) (KUNDUA; MISHRA, 2019).

Beeby e Nicol (1993) alcançaram remoções de turbidez da ordem de 96% tratando emulsões estabilizadas quimicamente com concentração inicial de óleo de 440 mg.L⁻¹ e distribuição de tamanho de gotas 90% abaixo de 10 µm. Como agente desestabilizante, foi utilizado um polímero floculante catiônico de alta massa molar. A máxima remoção de turbidez foi alcançada quando o pedestal estava completamente elevado, ou seja, pequena abertura anelar, resultando num fluxo na saída superior de 50% do total alimentado. Os autores concluíram que a viabilidade do método está na operação com o pedestal na posição mais baixa, com um tratamento secundário da água oleosa tratada. Nestas condições, a vazão do fluxo de saída inferior foi de 88-94% da alimentação, mas a concentração de óleo mínima atingiu valores de 50 mg.L⁻¹. A Figura 9 mostra o processo de flotação ASH simplificado (OLIVEIRA; RUBIO, 2012).

A separação de óleos emulsificados em um ASH necessita do controle de dois grupos de variáveis de processo (ROSA, 2003):

- 1) as condições químicas das interfaces óleo/água e ar/água, controlada pela adição de surfactante e floculante;
- 2) as condições de operação (vazões de ar e água e tamanho das aberturas das saídas superior e inferior).

Figura 9 - Flotação *air sparged hydrocyclone* - ASH



Fonte: Adaptado de Oliveira; Rubio (2012)

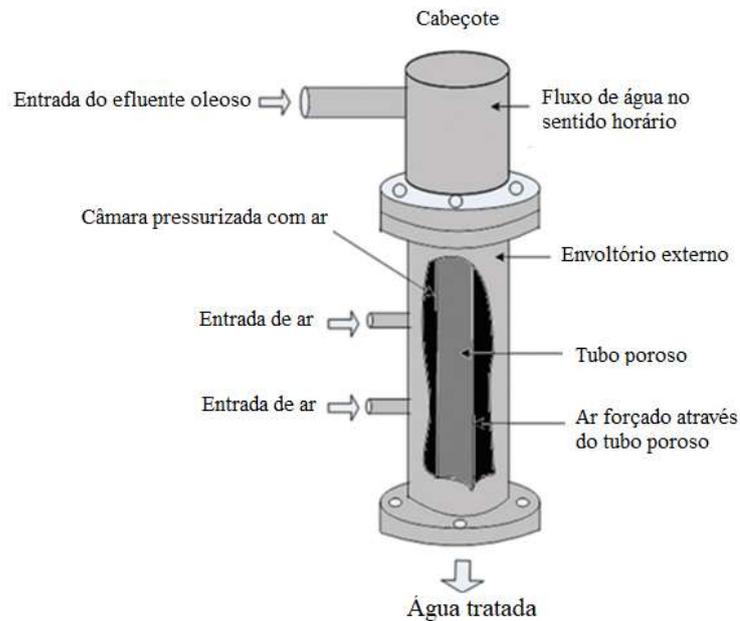
2.4.5 Flotação *bubble accelerated flotation* - BAF

A flotação BAF (*Bubble Accelerated Flotation*), baseia-se em modificações da flotação ASH, tornando capaz sua aplicação para processos de tratamento de efluentes. A deficiência apresentada pelo ASH é a geração de um fluxo de saída superior (material flotado), com grande quantidade de água e baixas concentrações de particulados. O *Bubble Accelerated Flotation* (BAF) é uma evolução da tecnologia ASH e não incorpora o pedestal que restringia a saída inferior e forçava a espuma e os contaminantes a mover-se em direção a saída superior, ou seja, que ascendesse à superfície, permitindo, assim, maior operacionalidade (COLIC *et al.* 2007; KUNDUA; MISHRA, 2019).

O sistema de flotação BAF é caracterizado por uma câmara e um tanque de separação. O efluente é introduzido tangencialmente. Essa injeção tangencial causa a aceleração centrífuga e cria um fluxo de redemoinho de certa espessura contra a parede do tubo poroso. A alta velocidade do fluxo cisalha o ar injetado pela parede do tubo poroso em pequenas bolhas que se direcionam rapidamente para a parte central do cilindro. Além de criar a aceleração radial das bolhas, o campo centrífugo também ajuda na classificação de partículas com densidades diferentes da água. Embora o tempo de residência do fluxo na câmara de bolha seja só uma fração de segundos, devido à aceleração rápida as bolhas, durante este tempo, as bolhas colidem

com as partículas formando o agregado bolha-partícula. Outra vantagem da injeção de ar é que limpa e protege o tubo poroso (ROSA, 2003). A Figura 10 mostra um flotor do tipo BAF.

Figura 10 - Flotador tipo BAF



Fonte: Adaptado de Kundua; Mishra, (2019)

O processo de flotação é completado fora da câmara de bolhas no tanque de separação BAF. Em um sistema de FAD, o tanque é projetado para permitir tempo de residência suficiente para as bolhas e as partículas colidirem, e para os agregados resultantes subirem à superfície. Isto resulta em uma exigência de baixas taxas de fluxo para permitir o agregado bolha-partícula se formar e flutuar à superfície sem ser arrastado para fora do sistema. O projeto do tanque de separação do BAF é diferente, pois os agregados bolha-partícula formam-se na câmara de bolhas antes de entrar no tanque. Ao contrário de outros tanques de flotação, o efluente da câmara de bolhas pode entrar no tanque acima do nível de água, resultando em uma distância mais curta para a espuma alcançar a superfície. Esta característica, combinada com o fato de os agregados estarem formados, permite altas taxas de fluxo no tanque de flotação (ROSA, 2003). Segundo Colic *et al.* (2007), a tecnologia BAF é particularmente eficiente na remoção de óleo livre e emulsificado.

2.5 CINÉTICA DE FLOTAÇÃO

O conhecimento da lei cinética no processo de flotação é uma característica importante, uma vez que pode ajudar a determinar a eficiência do mesmo, bem como auxilia a estabelecer

as equações de projeto e, conseqüentemente, necessárias ao scale-up do equipamento (MENEZES; SANTOS; SARUBBO, 2012).

A flotação é um processo físico-químico complexo, que envolve a interação de três fases (gasosa, líquida e sólida), utilizado para separação de determinados tipos de materiais. Conseqüentemente, a construção de modelos matemáticos de flotação se mostra muito difícil. Geralmente, em flotação, as substâncias hidrofóbicas com ângulo de contato com a água maior que zero, fixam-se a bolhas de gás, formam agregados estáveis de bolhas e se movem para superfície da célula de flotação, sendo recolhidos como um concentrado, também chamado de efluente tratado (KOWALCZUK; DRZYMALA, 2016).

A eficiência da flotação, em si, depende de muitos parâmetros, propriedades de substâncias flutuantes, ou seja, sua morfologia de superfície (tamanho, forma, hidrofobicidade, rugosidade e estrutura cristalina); tipo, construção e hidrodinâmica de dispositivos de flotação e; modo de trabalho, incluindo o tipo e dose de reagentes de flotação, tensão superficial de líquido, tamanho da bolha, pH, dentre outros. Qualquer alteração nos parâmetros de flotação pode influenciar todo o processo. Portanto, a seleção de parâmetros adequados é crucial para tornar o processo altamente eficaz em escalas laboratoriais e industriais (SZCZERKOWSKA *et al.* 2018).

Atualmente uma variedade de modelos diferentes foram postulados, com a intenção de descrever a cinética de uma célula de flotação (GHARAI; VENUGOPAL, 2016), usualmente usando cinética de primeira ordem baseada na concentração de material flutuante. Trabalhos recentes também desenvolveram modelos de como essas cinéticas dependem da química de superfície e dos parâmetros hidrodinâmicos (YOON *et al.* 2016; NEETHLING *et al.* 2019).

Modelos em micro e macro escala têm sido frequentemente usados para descrever a cinética de flotação. Nos modelos de microescala, os subprocessos do sistema de flotação são identificados e usados para determinar as relações de causa e efeito entre as variáveis do sistema. No entanto, a identificação de todo o subprocesso e as relações de causa e efeito correspondentes é extremamente difícil devido às interações entre parâmetros físico e químicos. Na modelagem em macro escala, a resposta geral do sistema de flotação está relacionada a vários parâmetros operacionais através de um conjunto de equações matemáticas (POLAT; CHANDER, 2000).

Os modelos cinéticos são estabelecidos com base na analogia entre uma reação química (colisão de moléculas) e um importante mecanismo de flotação, ou seja, a colisão entre partículas hidrofílicas ou hidrofóbicas e bolhas de ar no volume da zona de separação. É geralmente aceito que o primeiro papel com cinética de flotação foi publicado por Zuniga

(1935) no Chile. Ele aplicou a equação diferencial da cinética da reação química para retratar o processo de flotação e observou que a recuperação dessa é uma função exponencial do tempo de flotação. A Equação (5) diferencial de Zuniga pode ser escrita como (BU *et. al.* 2017):

$$\frac{dC_o}{dt} = -kC_o \quad (5)$$

Em que, $C_o(t)$ é a concentração de partículas flutuantes que permanecem na câmara de flotação até o tempo de flotação t ; k é a constante da taxa de flotação.

Posteriormente, Arbiter (1951) propôs uma equação de segunda ordem para representar os resultados de Zuniga (1935), Beloglazov (1939) e Sutherland (1948), bem como seus próprios resultados obtidos em testes laboratoriais e plantas indústrias. A Equação (6) proposta por Arbiter foi:

$$\frac{dC_o}{dt} = -kC_o^2 \quad (6)$$

As Equações 5 e 6 podem ser reescritas como:

$$\frac{dC_o}{dt} = -kC_o^n \quad (7)$$

Em que o parâmetro (n) caracteriza a ordem do processo, ou seja, a ordem da cinética de flotação.

A recuperação de partículas no produto de espuma (R), após o tempo de flotação (t), é definida através da Equação (8) como:

$$R(t) = \frac{C_{o0} - C_o}{C_{o0}} = 1 - \frac{C_o}{C_{o0}} \quad (8)$$

Sabendo que C_0 é a concentração de partículas flutuantes que permanecem na câmara de flotação com a condição inicial ($t = 0$), geralmente, considera-se que o valor de C_0 é igual a 1. Em outras palavras, não há produto de espuma no tempo de flotação inicial ($t = 0$).

Trabalhando algebricamente a Equação (9), temos:

$$R = C_o - 1 \quad (9)$$

Inserindo as equações 7 e 8 na Equação 9, temos:

$$\frac{dR}{dt} = kc(1 - R)^n \quad (10)$$

Operando de forma algébrica na Equação (10) temos:

$$\frac{dR}{dt} = k(1 - R)^n \quad (11)$$

Considerando a semelhança de um FPSI com uma bateria de tanques de mistura, para cinética de remoção da ordem n , temos a cinética de remoção de óleo de primeira ordem ($n = 1$), representada através da Equação (12):

$$C_{O_2} = \frac{C_{O_0}}{(1+k_1 \cdot \tau)^m} \quad (12)$$

Temos a concentração de óleo na câmara m , C_{O_2} (mg.L^{-1}), a constante de remoção cinética de óleo, para $n=1$, k_1 (min^{-1}) e o tempo de retenção de fluido no FPSI, t (min^{-1}).

O produto k_1 é identificado como um número de Damköhler adimensional para cinética de primeira ordem (HENAUTH *et. al.* 2017). Para remoção de segunda ordem ($n = 2$), o cálculo da concentração na saída de câmara 2 é dado pela Equação (13):

$$C_{O_2} = \frac{C_{O_0} \pm \sqrt{1+4 \cdot k_2 \cdot \tau \cdot \left(\sqrt{\frac{-1+4 \cdot k_2 \cdot \tau \cdot C_{O_0}}{2 \cdot k_2 \cdot \tau}} \right)}}{2 \cdot k_2 \cdot \tau} \quad (13)$$

A concentração de saída na câmara m , C_{O_2} (mg.L^{-1}), a constante de remoção cinética de óleo, para $n=2$, k_2 ($\text{mg.L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$). Neste caso o número adimensional de Damköhler é representado pela Equação (14):

$$\tau \cdot k_2 \cdot C_{O_0} \quad (14)$$

Para $n > 2$, não é possível usar uma expressão analítica geral e a concentração na saída de cada estágio deve ser estimado estágio por estágio. Assim, se o tempo espacial, inicial concentração, número de estágios e constante do óleo cinético leis de remoção são conhecidas, é possível estimar a remoção eficiência de um conjunto de “ m ” câmaras de flotação operando com pré-saturação induzida (SANTOS *et. al.* 2021).

3 METODOLOGIA

Nas próximas Seções do Capítulo 3 estão descritos os procedimentos, técnicas, instalações e montagens experimentais utilizadas para a implantação sistema de tratamento de água oleosa oriunda de uma indústria de produtos de limpeza.

3.1 ANÁLISE DO TEOR DE ÓLEO E GRAXAS

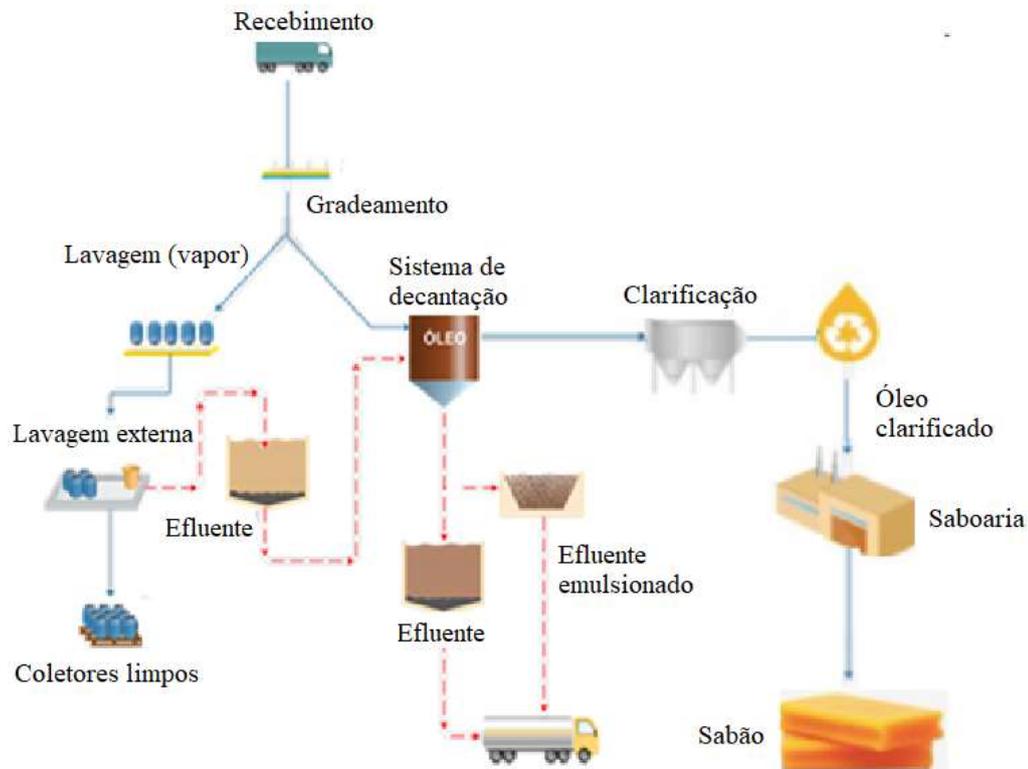
Para a realização das análises do teor de óleos e gorduras das amostras coletadas no sistema, foram utilizados 12 L de efluente. Esse material foi caracterizado através da análise do teor de ácidos graxos totais (AGT) (ABNT-NBR 13348/1995). Essa caracterização segue algumas etapas importantes, são estas:

- Homogeneização da amostra;
- Adicionar amostra do material (200 mL) a ser analisado em um béquer e acrescentar 4 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) P.A., aquecendo até dissolução;
- Transferir para um funil de separação de 1000 mL;
- Deixar esfriar até temperatura ambiente e adicionar o indicador alaranjado de metila;
- Realizar o processo de lavagem do béquer com hexano e transferir para o funil, onde ficará em repouso até obtenção da separação das fases;
- Desprezar a fase inferior do funil de separação e transferir a fase superior (matéria graxa + hexano) para um cadinho (50 mL);
- Colocar o cadinho na chapa aquecedora ($150^\circ C$) e aguardar a destilação;
- Quando o hexano tiver evaporado levar o material para estufa ($110^\circ C$) durante, aproximadamente, 20 minutos;
- Pesquisar o cadinho e registrar o valor.

3.2 CONDIÇÕES DE GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE OLEOSO

A Figura 11 apresenta o fluxograma. Este descreve as várias etapas envolvidas desde a coleta do óleo de fritura, passando pelo seu armazenamento, tratamento e posterior utilização como matéria-prima.

Figura 11 - Fluxograma do recebimento e tratamento do óleo



Fonte: Adaptado de Lins; Benachour; Moura (2018)

A coleta do ORF é realizada em estabelecimentos que produzem de forma contínua (cozinhas, bares, restaurantes) ou descontinuamente (pontos de entrega voluntária – PEV). A remoção das impurezas, como particulados sólidos, com tamanho aproximado de 5 mm é obtida pela separação através da passagem do óleo bruto por sistema de gradeamento (Figura 12).

Figura 12 - Gradeamento



Fonte: Adaptado de Lins; Benachour; Moura (2018)

A água contida no óleo pós-gradeamento é separada por sistema de decantação, em um equipamento alimentado por um fluxo de vapor de água, onde a emulsão água-óleo é

desestabilizada, tendo suas fases separadas, em água (fase interior), partículas orgânicas (fase intermediária) e óleo (fase superior), por diferença de densidade.

3.3 FPSI

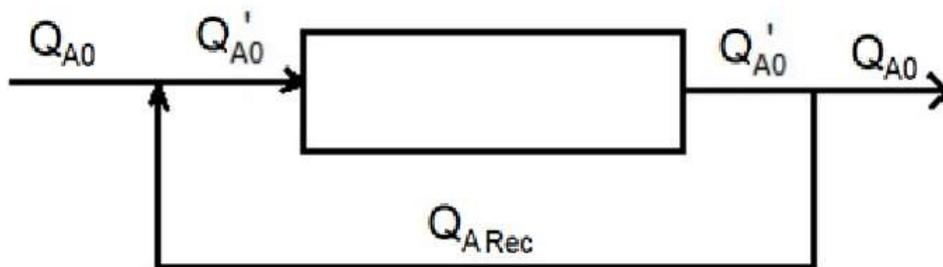
Em um FPSI, os estágios de saturação da mistura água-óleo e o início da formação de flocos com ou sem a adição de um auxiliar coletor, como um biossurfactante, são realizados simultaneamente durante a passagem desta mistura pela bomba de microbolhas. O ar e o efluente a ser tratado entram na linha de aspiração da bomba centrífuga, completando a pré-saturação dentro da descarga na linha da bomba de geração de microbolhas. No estágio ou câmara de floculação/separação, as gotículas de óleo são submetidas à flotação, formando uma espuma oleosa que ascende a superfície da câmara (SANTOS *et al.* 2021).

Pesquisadores tem reportado uma eficiência satisfatória na remoção de contaminantes com a FPSI, valores superiores a 95% de separação foram obtidos. A obediência a legislação vigente, baixo custo operacional e o alto índice de separação são fatores determinantes para utilização dessa técnica (SANTOS *et al.* 2021; FILHO *et al.* 2021).

3.4 OPERAÇÃO DO FPSI COM RECICLO

A razão de reciclo (R), é definida como a razão entre a vazão que recircula para a alimentação do FPSI e a vazão de saída deste flotador, de acordo com a Figura 13. A razão de reciclo foi escolhida como um parâmetro chave para a análise das condições operacionais do equipamento e a expressão para sua estimativa é mostrada pela Equação (15).

Figura 13 - Esquema da composição de fluxos para um processo com reciclo



$$R = \frac{Q_{ARec}}{Q_{A0}} \quad (15)$$

Em que Q_{A0} e Q_{ARec} são as vazões do efluente tratado e descartado e do efluente tratado e recirculado, respectivamente.

A vazão Q'_{A0} na entrada do flotador corresponde à soma da corrente de reciclo com a alimentação fresca, Q_{A0} . Assim, pode-se chegar a Equação (16):

$$Q'_{A0} = Q_{ARec} + Q_{A0} \quad (16)$$

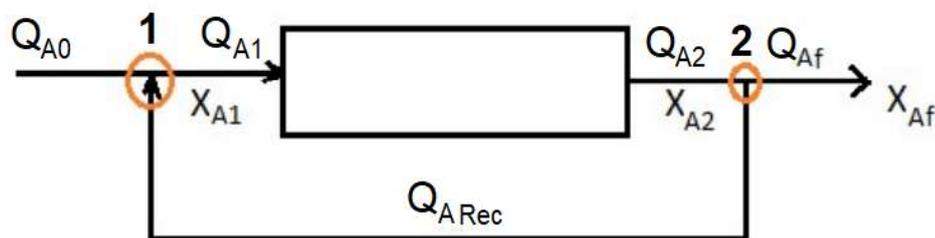
A qual, também pode ser escrita como:

$$Q'_{A0} = Q_{A0}(R + 1) \quad (17)$$

Este balanço global envolvendo apenas as vazões volumétricas não leva em consideração a eficiência de remoção de óleo (X_{A1}), sendo importante para definir a base de cálculo Q'_{A0} e assim poder correlacioná-la com a vazão real de entrada, Q_{A0} .

Para se levar em conta as frações de remoção de óleo na entrada do flotador (X_{A1}) e na saída do mesmo (X_{A2}), foi proposto o esquema mostrado pela Figura 14 na análise do balanço de óleo no FPSI. Observa-se nesta figura que a vazão de alimentação do óleo (componente A) na entrada do flotador é Q_{A1} . No entanto, a conversão de interesse na análise da eficiência de remoção de óleo do FPSI é a remoção fracionária de óleo X_{Af} , que representa a fração convertida da vazão de alimentação do sistema, Q_{A0} . Como a conversão de saída é importante para a análise da conversão fracionária recomenda-se que se estabeleça as correlações para: $X_{A1} = f(X_{Af})$ e $X_{A2} = g(X_{Af})$.

Figura 14 - Composição de fluxos e frações de remoção oleosa em processo com reciclo



Sabe-se que a remoção global (X_{Af}) é uma fração de Q_{A0} que se converte em Q_{Af} , conforme a Equação (18):

$$X_{Af} = \frac{Q_{A0} - Q_{Af}}{Q_{A0}} \quad (18)$$

Ou seja,

$$Q_{Af} = Q_{A0}(1-X_{Af}) \quad (19)$$

Dessa forma, na mesma linha de raciocínio de X_{Af} para X_{A2} , chega-se a $X_{A2}=X_{Af}$.

Partindo-se agora de que Q'_{A0} é o valor de Q_{A0} após a primeira passagem pelo flotor. Nestas condições, X_{A1} é a fração convertida de Q'_{A0} na corrente de entrada do flotor, ou seja:

$$X_{A1} = \frac{Q_{A0}-Q_{A1}}{Q_{A0}} \quad (20)$$

E aplicando o balanço de A,

$$Q_{AR}+Q'_{A0} = Q_{A1} \quad (21)$$

Chegamos a:

$$X_{A1} = \frac{R}{R+1} X_{Af} \quad (22)$$

3.5 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Os ensaios no flotor por pré-saturação induzida foram determinados por meio de planejamento experimental, fatorial do tipo 2^3 , com 4 repetições no ponto central. As variáveis de entrada correspondem a concentração do teor de óleos e graxas (mg.L^{-1}), vazão de alimentação (L.h^{-1}) e vazão de reciclo (L.h^{-1}). Os pontos fatoriais se encontram (+1 e -1), os axiais assumem valores (+1,68 e -1,68). Os valores dos pontos centrais foram de 950 mg.L^{-1} para concentração do teor de óleos e graxas, 402 L.h^{-1} para a vazão de alimentação e 204 L.h^{-1} para a vazão de reciclo. Os valores dos fatores codificados e reais para o delineamento composto central rotacional do FPSI-CS são demonstrados pela Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores codificados e reais para o DCCR do FPSI-CS

Fatores	Variáveis independentes	Padrão				
		-1,68	-1	0	+1,68	+1
X ₁	C (mg.L ⁻¹)	865	900	950	1000	1034
X ₂	Q _A (L.h ⁻¹)	296	336	402	462	507
X ₃	Q _R (L.h ⁻¹)	98	15	204	276	309

Fonte: O Autor (2022)

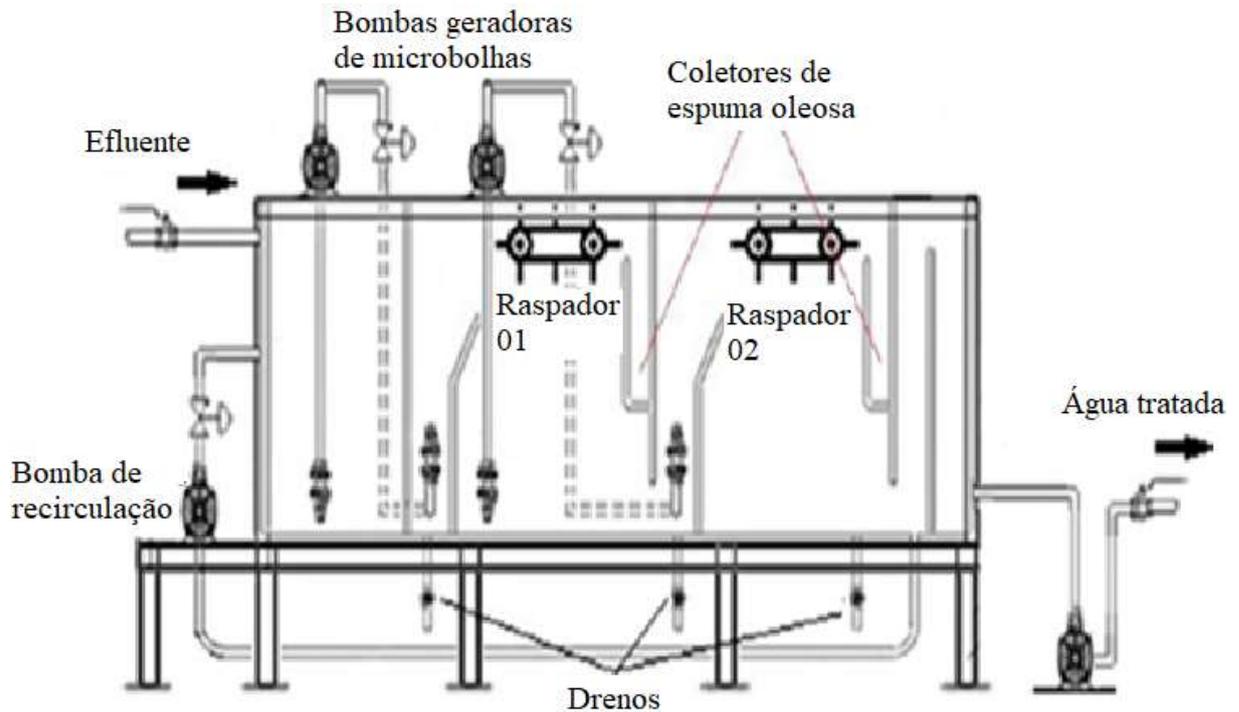
3.6 PROTÓTIPO DE FPSI-CS

O Flotador por Pré-Saturação Induzida Cabeça de Série é caracterizado por uma fase do projeto, que considera aspectos relativos à produção em pequena escala do protótipo obtido em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D de um ciclo. Procura-se, efetivamente, com o desenvolvimento de um cabeça de série (CS), melhorar as especificações, eliminando peças e componentes com dificuldade de reprodução em larga escala. Define-se, também, a linha de produção e as características básicas do produto. A partir do CS, realiza-se uma fabricação inicial, em menor escala, para ensaios de validação, avaliação do potencial de mercado e desenvolvimento, visando à produção industrial ou sua comercialização (SANTOS *et al.* 2021).

O FPSI foi fabricado em chapas de aço carbono, com paredes internas revestidas com resina epóxi, com o objetivo de garantir uma menor aderência ao efluente oleoso e estabelecer uma maior resistência à corrosão. Foi projetado com 2,5 m de comprimento, largura interna de 0,75 m e altura interna de 0,8 m comportando um volume útil total de 1,3 m³. Possui em sua base válvulas para drenos de esgotamento, facilitando o processo de limpeza em período de manutenção.

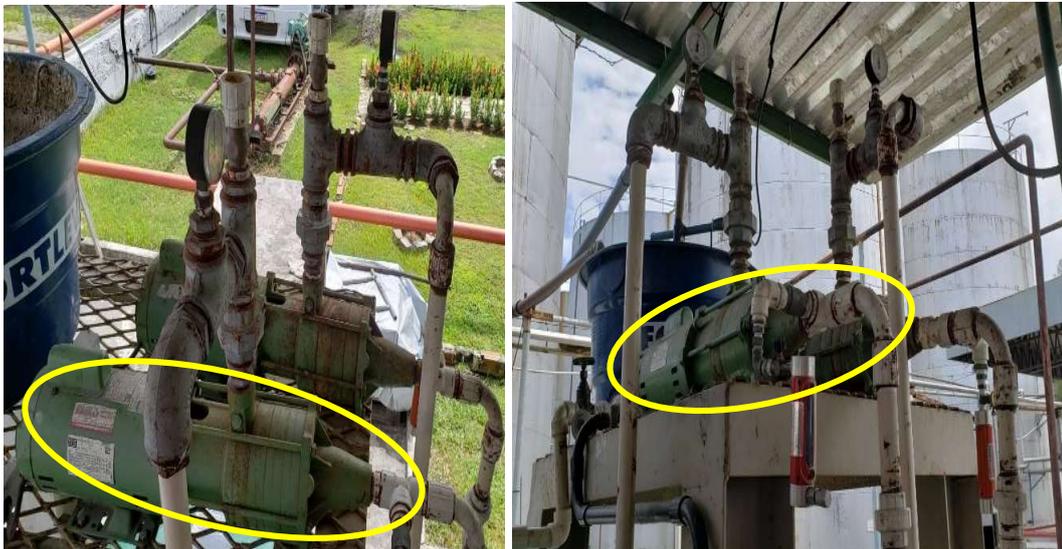
O FPSI-CS (Figura 15) utilizado neste trabalho possui duas câmaras de flotação, em série. O efluente oleoso, a ser tratado, entra na câmara de alimentação do equipamento, onde é aspirado, por uma bomba centrífuga multiestágio, adaptada para produção de microbolhas (Figura 16) (HENAUTH *et al.* 2017).

Figura 15 - Esquema dos componentes do Flotador com Pré-saturação Induzida



Fonte: O Autor (2021)

Figura 16 - Bomba centrífuga multiestágio utilizada na primeira câmara do FPSI-CS



Fonte: O Autor (2021)

A referida bomba descarrega o efluente saturado com microbolhas de ar na entrada da primeira câmara de flotação. A atuação desta bomba garante um contato bastante íntimo entre o efluente não saturado e as microbolhas de ar. A câmara de flotação passa então a ter uma única função de vaso separador de líquido e da espuma oleosa formada nas vizinhanças de sua superfície livre (Figura 17).

Figura 17 - Espuma oleosa formada na câmara de flotação do FPSI-CS



Fonte: O Autor (2021)

Uma segunda bomba centrífuga multiestágio, adaptada para produção de microbolhas, aspira o efluente líquido na base da primeira câmara e descarrega este líquido ressaturoado na base entrada inferior da segunda câmara de flotação. Na segunda câmara de flotação repete-se o processo de separação.

Com a estratégia de gerar microbolhas utilizando o próprio efluente de entrada, transformou-se a câmara de flotação em uma espécie de meio reacional com um mecanismo mais simples. Testes experimentais documentados na literatura indicaram um comportamento cinético de uma reação de primeira ordem para separação água-óleo em uma câmara de FPSI. Com base nesta premissa e adotando uma analogia de comportamento de um reator de mistura perfeita (CSTR) para o estágio da câmara de FPSI, a análise deste sistema passou a ser a de uma bateria de reatores CSTR em série. Quando se deseja uma conversão mais alta que aquela obtida em um único reator CSTR, costuma-se utilizar uma bateria deste tipo de reator em série, onde o fluxo de saída do primeiro é utilizado na alimentação do segundo e assim por diante.

O dimensionamento do Protótipo Cabeça de Série do FPSI foi gerado a partir das correlações de *scale-up*, obtidas em um protótipo piloto. Foram realizados cálculos a partir de dados fornecido pela Indústria de Produtos de Limpeza. A produção diária máxima foi de, aproximadamente, 1 m^3 . Com base nesta capacidade foi estimada uma vazão média de $0,17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de efluente a ser tratado. Para os testes realizados foram utilizados, cerca de, $500 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$.

Cada câmara de flotação do protótipo de FPSI tem volume de $0,5 \text{ m}^3$ e as vazões combinadas de microbolhas e efluente a ser tratado somam $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Neste caso o tempo de residência médio, a partir da aplicação da Equação (23) é:

$$\tau_m = \frac{V_m}{Q_m} = \frac{0,5}{0,5} = 1h \quad (23)$$

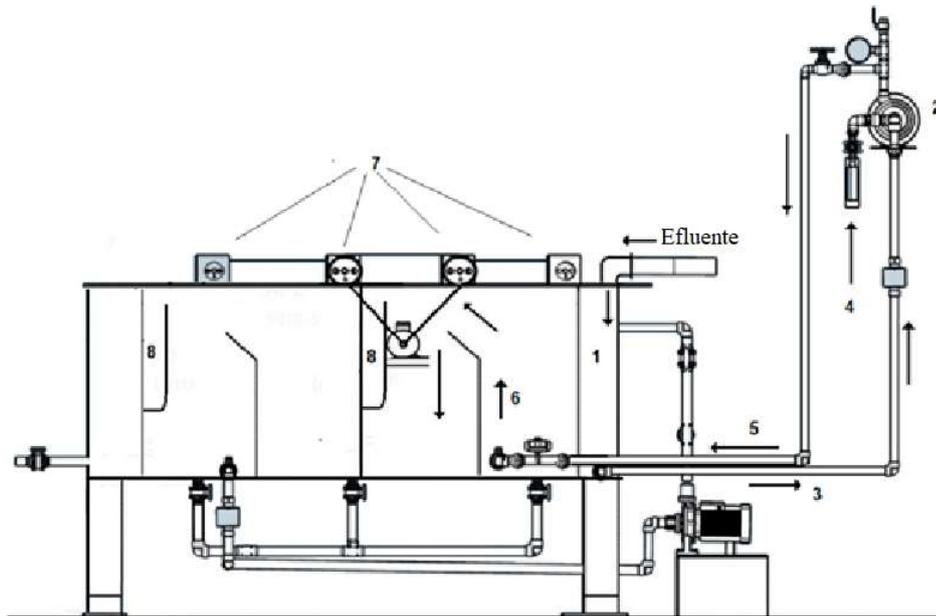
Admitindo-se que o modelo tenha sido construído em escala de 1:1, o tempo de residência médio do protótipo semi-industrial será o mesmo do modelo de bancada, atendendo aos requisitos de semelhança dinâmica.

3.7 OPERAÇÃO DO FPSI

O efluente do sistema chega ao FPSI, como mostrado no desenho esquemático (Figura 18) pela câmara de recepção (1), onde é aspirado por uma bomba centrífuga multiestágio (2), a qual aspira, simultaneamente, o efluente (3) e ar atmosférico (4), para descarregar o referido líquido saturado de microbolhas (5) na base da entrada da primeira câmara de flotação (6). Este estado pré-saturado retira da câmara de saturação a etapa de floculação, obtida pela interação entre a fase particulada (óleo) e as microbolhas – comum em um sistema de flotação por ar dissolvido convencional.

No FPSI as microbolhas entram em contato com o efluente, a ser tratado, no interior da bomba centrífuga e forma flocos (ar/água/gotículas de óleo) quando da passagem pela tubulação de descarga da referida bomba. Resta à câmara de flotação apenas as etapas de flotação e de separação entre a fase aquosa e a espuma oleosa formada. No topo da primeira câmara de flotação raspadores mecânicos de espuma (7), acionado eletricamente, fazem a retirada da espuma oleosa resultante da flotação de flocos formados por gotículas de óleo e microbolhas de ar. A referida espuma oleosa é coletada por *skimmers* instalados na extremidade superior de saída da câmara de flotação (8).

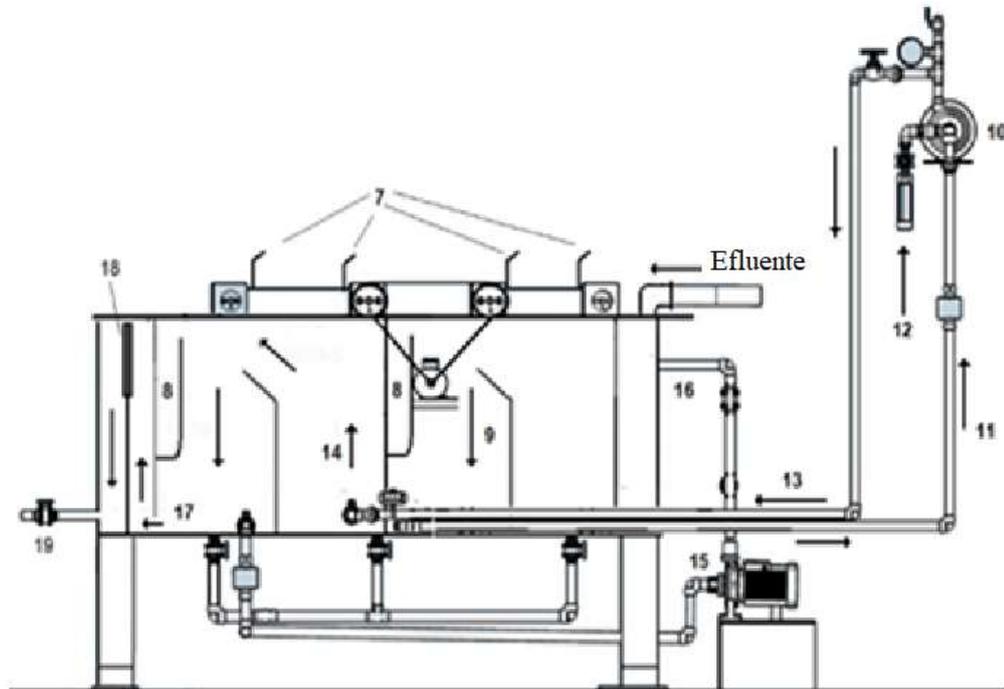
Figura 18 - Fluxo da água oleosa através da primeira câmara do FPSI-CS



Fonte: O Autor (2021)

A Figura 19 mostra um esquema da segunda câmara de flotação e seus componentes. A água oleosa residual da primeira câmara de flotação (14), após a separação de parte do óleo, convertido em espuma oleosa, flui para a parte inferior (9) da referida câmara. Ainda na base dessa primeira câmara a tubulação de aspiração de uma segunda bomba centrífuga multiestágio (10) succiona, simultaneamente, a água oleosa residual (11) e ar atmosférico (12), misturando estes dois fluidos em seus estágios e ao longo de sua tubulação de descarga (13) ao logo da qual são formados os flocos constituídos de gotículas de óleo e microbolhas. Semelhante a primeira, esta segunda bomba descarrega o efluente ressaturado na base da segunda câmara de flotação (14).

Figura 19 - Fluxo da água oleosa através da segunda câmara do FPSI-CS

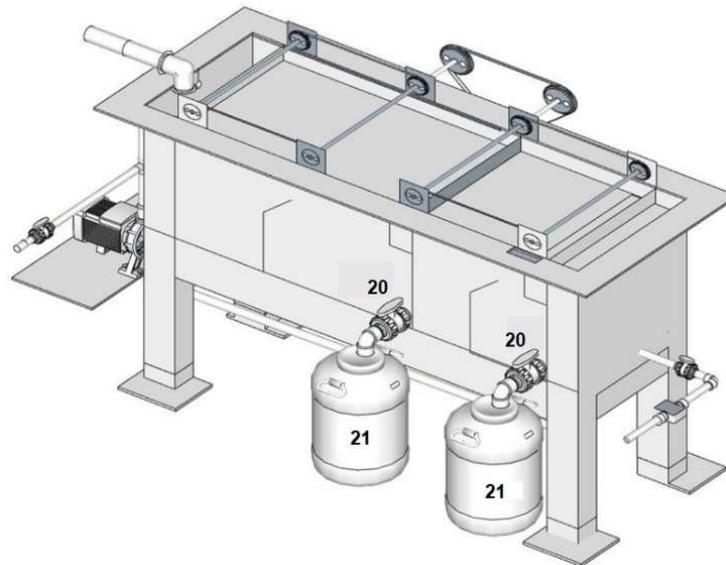


Fonte: O Autor (2021)

Novamente, a espuma oleosa é retirada pelo topo da segunda câmara de flotação para o coletor, também chamado de *skimmer* (8). Na base desta segunda câmara de flotação, a tubulação de aspiração de uma bomba centrífuga convencional (15) recircula este líquido para a entrada (16) da câmara de recepção do FPSI. Ainda, na base dessa segunda câmara, uma abertura (17) deixa passar efluente tratado para uma câmara de água tratada, cujo nível da coluna líquida é limitado por um vertedouro (18). O nível do vertedouro, responsável pela altura da coluna d'água em operação no FPSI, é controlado manualmente com auxílio de um regulador do tipo volante. O referido vertedouro libera água tratada pelo FPSI, através de uma válvula (19) cuja abertura é controlada manualmente.

A espuma oleosa coletada pelos *skimmers*, com auxílio dos raspadores mecânicos são drenadas destes coletores através de válvulas esferas manuais (20) para bombonas (21) de 50 L de capacidade cada (Figura 20). A espuma oleosa coletada deve ser descartada por uma empresa certificada ou reutilizada pelo processo fabril da indústria de produtos de limpeza.

Figura 20 - FPSI-CS e o descarte de espuma oleosa através de bombonas



Fonte: O Autor (2021)

3.8 ELABORAÇÃO DE UM FLUXO DE CAIXA PARA O FPSI-CS

a) Investimento

Os valores dos investimentos realizados na indústria química de produtos de limpeza encontram-se na Tabela 9:

Tabela 9 - Discriminação dos valores investidos no FPSI-CS

Item	Valor (R\$)
ASA	
Obras Civis	16.000,00
Tanques	8.000,00
Bomba	250,00
Quadro elétrico auxiliar	5.000,00
Programa P&D	
Obras Civis/Const. Ortogonal	18.234,71
Obras Mecânicas/Const. DB	70.000,00
Obras Elétricas/Villaz Engenharia	12186,63
Total	129.671,34

Fonte: O Autor (2021)

b) Estimativa de possíveis receitas

Receita 01 - Disposição de resíduos – a receita gerada na indústria química de produtos de limpeza pelo emprego do FPSI, após a implantação do referido sistema, foi estimada de acordo com os seguintes itens:

Disposição de resíduos (Receita 1) – Valor estimado com base no custo do descarte do volume de água oleosa com descarte certificado junto ao órgão ambiental competente é dado conforme Equação (24):

$$R01 = V_{AO} \cdot t_{m/a} \cdot C_{DC} \quad (24)$$

Em que:

V_{AO} – Volume de água oleosa gerada pela empresa, m³/mês;

$t_{m/a}$ – Número de meses por ano;

C_{DC} – Custo atual de descarte certificado da água oleosa, R\$/m³.

Uma consulta ao mercado de empresas certificadas obteve-se a seguinte informação atualizada:

- Custo de um caminhão com capacidade de 20 m³ para transporte – R\$ 970,00;
- Custo de transporte por m³ de água oleosa do tipo óleo vegetal – R\$ 170,00;
- Tomando-se por base um caminhão, o custo do m³ fica:

$$C_{CD} = \frac{[(20 \cdot 170) + 970]}{20} = R\$218,50 \quad (25)$$

Receita 02 – Reuso de água – o valor do volume de água recuperada anualmente para reuso, com a operação do FPSI-CS, deve ser estimado com base no tratamento de 1000 L/dia de efluente oleoso. A indústria química de produtos de limpeza possui poços artesianos e não paga tarifa desse consumo de água, pagando apenas a taxa de esgoto, conforme a tabela de tarifas da COMPESA (Tabela 10). Estas informações foram prestadas pela Diretoria da Empresa. Entretanto, este é um caso atípico e o EVTE do FPSI-CS da referida indústria deve levar em consideração o caso em que o custo da água de reuso seja computado. Daí, o valor da receita com a possibilidade de reuso da água recuperada com a operação do FPSI-CS deve ser estimado de acordo com a expressão de cálculo, Equação (26):

$$R02 = Q_N \cdot \varepsilon \cdot T_{h/d} \cdot T_{d/s} \cdot 52 \cdot FU \cdot T_{COMPESA} \quad (26)$$

Em que:

Q_N – Vazão nominal de operação do FPSI-CS, $m^3 \cdot h^{-1}$;

ε – Eficiência de separação água-óleo, -;

$T_{h/d}$ – Tempo de operação em horas por dia, h/d;

$T_{d/s}$ – Tempo de operação em dias por semana, d/s;

FU – Fator de utilização;

$T_{COMPESA}$ – Tarifa cobrada pela COMPESA, R\$/ m^3 .

Tabela 10 - Tabela de tarifas para consumidores industriais adotada pela COMPESA

		COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO DIRETORIA DE MERCADO E ATENDIMENTO - DMA ESTRUTURA TARIFÁRIA	
DECRETO ESTADUAL Nº 18.251 DE 21/12/1994.		Vigência: 19 de Agosto de 2021	
ÁGUA TRATADA		Resolução ARPE Nº 192/2021 - Publicada no DOE nº. 136 de 20/07/2021	
Consumidores Medidos		Reposicionamento tarifário incremental de 11,90%, exceto na Tarifa Social (Resolução ARPE Nº 193 - Publicada no DOE nº. 142 de 28/07/2021), válido a partir de 19 de Agosto de 2021.	
Categoria	Consumo (litros)	Valor (R\$)	
ÁGUA BRUTA			
Comercial e Industrial			
	entre 51 e 5.000 m ³	2,75 por 1.000 l	
	entre 5.001 e 19.999 m ³	2,26 por 1.000 l	
	a partir de 20.000 m ³	1,26 por 1.000 l	
ESGOTAMENTO SANITÁRIO			
SISTEMA CONVENCIONAL			
Ligação Convencional ou ramal de calçada - 100% da tarifa de água			
Ramal Condominial (operado p/ Comunidade) - 50% da tarifa de água			
SISTEMA SIMPLIFICADO			
Ligação Convencional ou ramal de calçada - 80% da tarifa de água			
Ramal Condominial (operado p/ Comunidade) - 40% da tarifa de água			
DRENO			
Ligação Convencional ou ramal de calçada - 50% da tarifa de água			
Ramal Condominial (operado p/Comunidade) - 30% da tarifa de água			
PRÉDIOS EM CONSTRUÇÃO			
50% do valor dos serviços de esgotos estipulados no momento da ligação, cobrados até a concessão do habite-se.			

Fonte: Agência de Regulamentação de Pernambuco (2021)

c) Custos Operacionais

Os referidos custos foram estimados com base nos seguintes itens:

Custos 01 - Consumo de energia

Baseou-se no número de motores em funcionamento durante o período de operação anual do FPSI na indústria química de produtos de limpeza, Equação (27):

$$C01 = 0,7457 \cdot P_T \cdot C_E \cdot t_{h/d} \cdot t_{d/sem} \cdot t_{sem/a} \quad (27)$$

Em que:

0,7457 – Fator de conversão de cv em kW;

P_T – Soma total das potências dos motores existentes, cv;

C_E – Custo da tarifa de energia elétrica, R\$/kW;

$T_{h/d}$ – Número de horas de operação por dia, h/dia;

$T_{d/sem}$ – Número de horas de operação por semana, d/semana;

$t_{s/a}$ – Número de semanas de operação por ano, semana/a.

Custos 02 - Mão de obra

Na indústria química de produtos de limpeza, o pessoal encarregado das tarefas no setor denominado “Derretedor”, fica encarregado de operar o FPSI-CS. No Derretedor as bombonas contendo óleo residual de fritura, para produção de sabão em barra, são recebidas, descarregadas sob aquecimento a vapor, lavadas e disponibilizadas para reiniciar uma nova coleta. Em virtude do baixo volume de efluente a ser tratado e, em função das horas ociosa do pessoal que atua no Derretedor, parte dessa equipe desloca-se diariamente para operar o FPSI, não sendo computado, portanto, custo com mão de obra para operação do referido sistema.

Custo 03 - Manutenção

Uma consulta a manuais de instruções dos equipamentos associados constituintes do FPSI (bombas, motores, sensores de níveis, medidores de vazão) e uma vez seguido o cronograma de manutenção constante no Manual de Instruções do FPSI, chegou-se a uma estimativa de manutenção de R\$ 1500,00 por ano, com as devidas correções ano a ano.

$$C03 = R\$1.500,00/\text{ano} \quad (28)$$

Custo 04 - Produtos químicos

Como produtos químicos essenciais à verificação dos teores de óleos e graxas (TOG), foram identificadas o hexano (8 L/ano) e o ácido sulfúrico (2 L/ano). O ácido é necessário para quebra da emulsão água-óleo em meio ácido. O alto grau de emulsificação do efluente se dá devido à grande concentração de substâncias emulsificantes em um efluente de uma fábrica de sabão é dado pela Equação (29).

$$C04 = (V_{\text{HEXANO}} \cdot C_{\text{HEXANO}} + V_{\text{ÁCIDO}} \cdot C_{\text{ÁCIDO}}) + C_{\text{AC}} \quad (29)$$

Em que:

$N_{A/S}$ – Número de análises por semana (3);

V_{HEXANO} – Volume de hexano por ano, L;

C_{HEXANO} – Custo do hexano, R\$/L;

$V_{\text{ÁCIDO}}$ – Volume de hexano por ano, L;

$C_{\text{ÁCIDO}}$ – Custo do ácido, R\$/L.

$C_{A/C}$ – Custo anual de análises certificadas, R\$

Custos 05 – Depreciação

$$C05 = 0,1 \cdot C_{D_{\text{FPSI}}} \quad (30)$$

Em que:

C_D – Custo com depreciação do FPSI-CS.

Custo 06 – Custos com IRPJ/CSLL

Em resumo, no Lucro Real os dois tributos variam de 24% (9% + 15%) a 34% (9% + 25%), aplicados sobre o Lucro e não sobre o faturamento, Equação (31):

$$C06 = (L_{\text{SIRPJ}} - T_D) \cdot A_{\text{IRPJ/CSLL}} \quad (31)$$

Em que:

L_{SIRPJ} – Lucro sem o IRPJ, R\$;

T_D – Taxa de depreciação, R\$;

$A_{IRPJ/CSLL}$ – Alíquota usada para cálculo do IRPJ/CSLL.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas próximas Seções do Capítulo 4 estão descritos e comentados os resultados da concepção e dimensionamento da planta semi-industrial de FPSI, a eficiência de remoção de óleos e graxas, o fluxo de caixa e indicadores econômicos, os procedimentos, técnicas, instalações e montagens experimentais utilizadas para a implantação sistema de tratamento de água oleosa oriunda de uma indústria de produtos de limpeza.

4.1 CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA PLANTA SEMI-INDUSTRIAL

Considerando a construção do Flotador, um projeto conceitual foi desenvolvido para a empresa parceira, sendo necessária a obtenção de alguns parâmetros para a realização dos ensaios, a fim de obter mais informações relevantes às pesquisas (PAGAN; SILVA; MELLO, 2013). Um exemplo disto foi o conceito de flotador de pré-saturação induzida (FPSI) desenvolvido pelos pesquisadores (SANTOS *et al.* 2021).

O projeto detalhado, também chamado de "projeto executivo", destinou-se a fornecer os elementos para a construção e montagem do protótipo de FPSI-CS. O conjunto de informações necessárias e suficientes para a elaboração de um projeto executivo foi definido com auxílio do projeto conceitual e de um projeto básico, os quais, como visto, representaram uma etapa prévia do desenvolvimento do projeto detalhado (WOLDEMICHAEL; HASHIM, 2014).

4.1.1 Construção mecânica do FPSI-CS

Para a construção do FPSI-CS da indústria de produtos de limpeza, foi definido o escopo mecânico/hidráulico baseado no projeto executivo. Resumidamente, o escopo contempla:

- Fornecimento e implantação de decantador comercial;
- Fabricação e montagem de plataforma de suporte para o decantador;
- Fabricação e implantação do flotador e acessórios;
- Fornecimento e montagem das tubulações de ligação entre os componentes.

O Flotador por Pré-Saturação Induzida Cabeça de Série foi fabricado e passou por testes preliminares de estanqueidade. Os resultados iniciais desses testes indicaram a necessidade de ajustes de fabricação, uma vez que o vertedouro não era capaz de manter a estanqueidade quando passava por regulagens de altura. A solução encontrada para este problema passou pela troca da especificação da borracha de vedação. A fabricação do FPSI-CS foi concluída e o

equipamento foi transportado e posicionado na base civil do sistema de tratamento da indústria de produtos de limpeza. A Figura 21 mostra o flotador devidamente instalado.

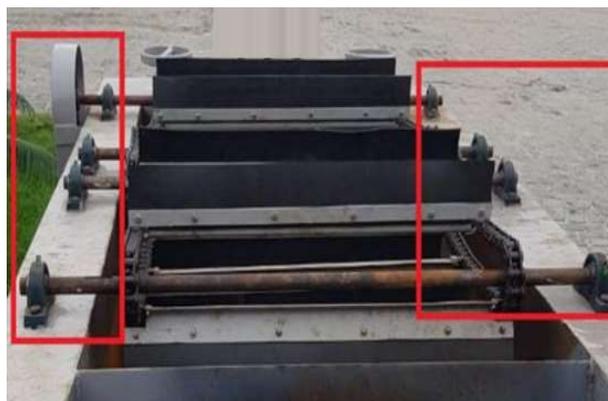
Figura 21 - FPSI-CS instalado na base civil do sistema de tratamento



Fonte: O Autor (2021)

Após a instalação do FPSI-CS, foi realizada uma cuidadosa inspeção técnica para identificar problemas de qualidade com o equipamento, que inviabilizariam o seu funcionamento planejado. Na Figura 22 é mostrada, por exemplo, a montagem de 8 mancais em desalinhamento, o que se tornou impeditivo o movimento dos raspadores de espuma oleosa.

Figura 22 - Mancais em desalinhamento no FPSI-CS



Fonte: O Autor (2021)

O FPSI-CS foi retirado da indústria de produtos de limpeza e foi transportado para a usinagem, onde foram realizados os ajustes necessários. Após os devidos reparos, o FPSI-CS retornou para a indústria de produtos de limpeza. Concluiu-se assim, a montagem das instalações hidráulicas e da automação, conforme mostrado através da Figura 23.

Figura 23 - Instalações hidráulicas do FPSI-CS



Fonte: O Autor (2021)

Visando aumentar a flexibilidade dos testes e enriquecer a coleta de dados foram ajustadas as instalações hidráulicas e desenvolvido um sistema de dosadores para alimentação contínua do FPSI-CS. Os testes foram iniciados com aplicação de planejamentos experimentais. Para o FPSI-CS foi realizado um estudo paramétrico de resposta direta sobre a razão de reciclo (R) do equipamento, definida como a razão entre a vazão volumétrica de fluido que retorna ao flotor e a vazão volumétrica de alimentação.

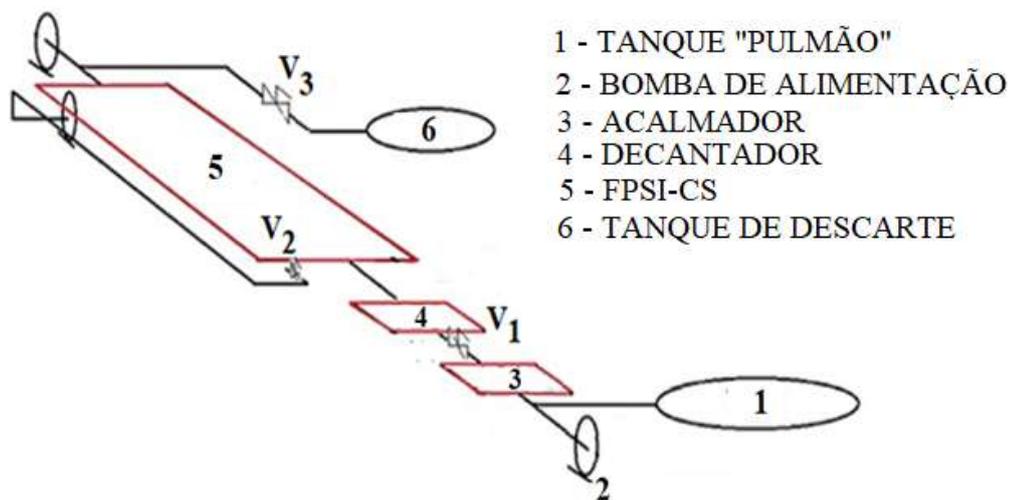
Posteriormente, através de uma inspeção visual junto ao FPSI-CS da indústria de produtos de limpeza, foi verificada a necessidade de realizar a recuperação da superfície interna do flotor e do mecanismo de acionamento e regulagem do vertedouro, que tinham presença de corrosão. Iniciou-se a recuperação da superfície interna e pintura com resina Epóxi; desmontagem e remontagem do raspador do FPSI-CS e substituição das peças do mecanismo de acionamento do vertedouro por equivalentes em aço inox. Com a finalização dos serviços mencionados, o cabeça de série estava liberado para a realização de novos testes.

4.2 ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS

Nesta fase, foram realizados experimentos com o FPSI-CS de forma a se testar o desempenho deste flotor para diferentes configurações operacionais em relação à sua razão de reciclo. Para isto foi elaborado um diagrama de operação simplificado (Figura 24), envolvendo os fluxos externos de afluente e efluente. Os fluxos através das bombas de microbolhas não foram incluídos no referido diagrama, ou seja, a identificação espacial das válvulas que permitiam manobras para as diferentes condições operacionais requeridas. Para

cada uma dessas válvulas existe um medidor em série, para identificar a vazão através da mesma. Além disso, uma manobra sem reciclo, se obtinha com as válvulas V_1 e V_3 abertas e V_2 totalmente fechada. Para determinado valor de reciclo as válvulas V_1 , V_2 e V_3 ficariam parcialmente abertas. Para um reciclo total, apenas as válvulas V_1 e V_2 permaneciam abertas e V_3 era mantida totalmente fechada.

Figura 24 - Diagrama simplificado de operação do FPSI-CS



Fonte: O Autor (2021)

A operação do FPSI-CS durante os testes foi iniciada com a válvula V_3 totalmente fechada. Vários testes foram realizados com esta configuração, variando-se as vazões do efluente, retornando todo o material pelo reciclo e definindo-se uma vazão média de 612 L.h^{-1} através das bombas de microbolhas, quando foi possível obter o valor mais alto para a eficiência de separação. Dessa forma, chegou-se à identificação das melhores condições de vazão e pressão para a obtenção de microbolhas.

Como variável resposta e de entrada, do planejamento tipo DCCR 2^3 , foi utilizada a eficiência de separação água-óleo no FPSI-CS. A Tabela 11 apresenta os valores das variáveis resposta para cada conjunto de experimento. Observando-se a referida tabela chega-se às seguintes observações sobre as condições operacionais do processo:

Tabela 11 – Planejamento tipo DCCR 2^3 com variáveis independentes em valores reais

Corridas	Valores reais
----------	---------------

	Teor de óleos e graxas no efluente (mg.L⁻¹) (C)	Vazão de efluente (L.h⁻¹) (Q_A)	Vazão de reciclo (L.h⁻¹) (Q_R)	Eficiência de remoção (%) (EFIC)
1	900,000	336,0000	150,0000	91,30
2	900,000	336,0000	276,0000	79,50
3	900,000	462,0000	150,0000	96,43
4	900,000	462,0000	276,0000	93,10
5	1000,000	336,0000	150,0000	92,40
6	1000,000	336,0000	276,0000	90,03
7	1000,000	462,0000	150,0000	93,00
8	1000,000	462,0000	276,0000	93,09
9	865,910	402,0000	204,0000	89,70
10	1034,090	402,0000	204,0000	96,43
11	950,000	296,0471	204,0000	94,09
12	950,000	507,9529	204,0000	94,20
13	950,000	402,0000	98,0471	93,69
14	950,000	402,0000	309,9529	89,04
15	950,000	402,0000	204,0000	99,49
16	950,000	402,0000	204,0000	99,38
17	950,000	402,0000	204,0000	99,50
18	950,000	402,0000	204,0000	99,39

Fonte: O Autor (2022)

- Valores intermediários das variáveis independentes ($C = 950 \text{ mg.L}^{-1}$; $Q_A = 402 \text{ L.h}^{-1}$; $Q_R = 204 \text{ L.h}^{-1}$) levaram a uma eficiência máxima ($> 99\%$), implicando em uma escolha correta das faixas de valores adotados para essas variáveis e condições de trabalho;
- Valores mínimos dos fatores, ou variáveis independentes ($C = 900 \text{ mg.L}^{-1}$; $Q_A = 336 \text{ L.h}^{-1}$), com excessão da vazão de reciclo, levaram a um valor mínimo de eficiência de separação (79,5%), provavelmente pela elevada vazão de reciclo promover uma diluição na câmara de mistura acarretando baixa concentração de particulado oleoso;
- Valor mínimo de concentração de óleo (865 mg.L^{-1}), mantido os valores intermediários das vazões de alimentação (402 L.h^{-1}) e reciclo (204 L.h^{-1}) leva a uma baixa eficiência (89,7%), provavelmente pela baixa concentração de particulado oleoso promovendo um efeito similar a diluição;

- Valor máximo de vazão de reciclo (309 L.h^{-1}), mantido os valores intermediários da vazão de alimentação (402 L.h^{-1}) e concentração de óleo (950 mg.L^{-1}), leva a uma baixa eficiência (89,04%), provavelmente pela baixa concentração de particulado oleoso promovido pelo efeito de diluição gerada pela elevada taxa de reciclo;
- Valor máximo da vazão de alimentação (507 L.h^{-1}), mantido os valores intermediários de vazão de reciclo (204 L.h^{-1}) e concentração de óleo (950 mg.L^{-1}), leva a uma considerável eficiência (94,2%), sem atingir o valor máximo, provavelmente pelo efeito análogo a diluição, acarretando concentração de particulado oleoso;
- Valor máximo de concentração de óleo (1034 mg.L^{-1}), mantido os valores intermediários das vazões de alimentação (402 L.h^{-1}) e reciclo (204 L.h^{-1}), promove uma significativa eficiência (96,43%), sem atingir o valor máximo, provavelmente efeito comparável a diluição, acarretando elevada taxa de particulado oleoso.

A Tabela 12 mostra os resultados da análise de variância (ANOVA) para a aquisição de um modelo de previsão com um intervalo de confiança de 95%. A correlação entre os dados experimentais e os valores previstos pelo modelo foi satisfatória ($R^2 = 92,2\%$). Além disso, o teste de Fisher revelou que o modelo foi estatisticamente significativo e preditivo com um erro experimental inferior a 0,1%.

Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA)*

Fatores	SS	df	MS	F	P
----------------	-----------	-----------	-----------	----------	----------

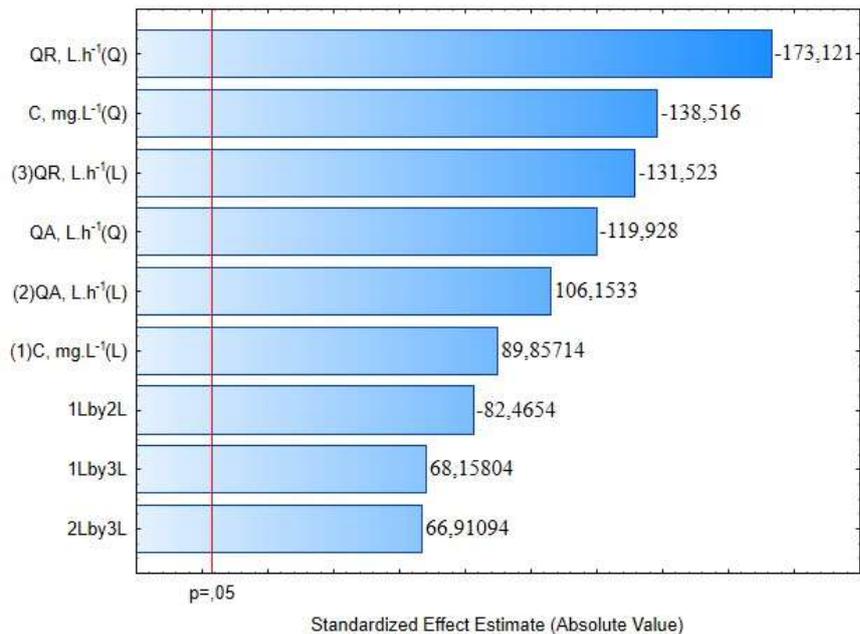
(1) Teor de óleos e graxas no afluente (mg.L⁻¹) (L)	32,8355	1	32,8355	8074,31	0,000003
Teor de óleos e graxas no afluente (mg.L⁻¹) (Q)	78,0263	1	78,0263	19186,79	0,000001
(2) Vazão de afluente (L.h⁻¹) (L)	45,8253	1	45,8253	11268,52	0,000002
Vazão de afluente (L.h⁻¹) (Q)	58,4896	1	58,4896	14382,68	0,000001
(3) Vazão de reciclo (L.h⁻¹) (L)	70,3463	1	70,3463	17292,26	0,000001
Vazão de reciclo (L.h⁻¹) (Q)	121,8816	1	121,8816	29970,88	0,000000
1L 2L	27,6555	1	27,6555	6800,54	0,000004
1L 3L	18,8918	1	18,8918	4645,52	0,000007
2L 3L	18,2068	1	18,2068	4477,07	0,000007
Erro experimental	31,8772	5	6,3754	1567,73	0,000025
Erro puro	0,0122	3	0,0041		
Total SS	408,1591	17			

Fonte: O Autor (2022)

* Nível de confiança de 95%

No diagrama de Pareto (Figura 25), são mostradas as contribuições dos termos do modelo estatístico de previsão, dentro dos intervalos de condições de valores adotados para os fatores do DCCR. A partir deste diagrama, observa-se que todos os termos do modelo de previsão para a eficiência de separação nas câmaras do FPSI-CS são estatisticamente significativos. Pode-se destacar, contudo, que existe uma maior contribuição dos termos envolvendo a vazão de reciclo (Q_A). Percebe-se ainda, que a interação entre os fatores se mostrou com relativa significância, de modo que a variação de qualquer um destes, para se obter um efeito desejado, induz certa interferência na contribuição do outro fator.

Figura 25 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados de eficiência de separação



Fonte: O Autor (2022)

Durante a execução dos testes experimentais observou-se a existência de limitações operacionais em função das características de alguns componentes que alimentam o sistema. Um desses pontos críticos foi observado na alimentação de efluente para a câmara de entrada do flutuador. A força motriz responsável pela alimentação dessa câmara é a diferença de nível da própria câmara para o decantador separador de óleo livre. Para pequenas vazões este sistema responde satisfatoriamente. Entretanto, para vazões acima de 600 L.h⁻¹ existe uma grande dificuldade, uma vez que vazões acima desse valor levaria o decantador a operar indevidamente pela ocorrência de transbordamento.

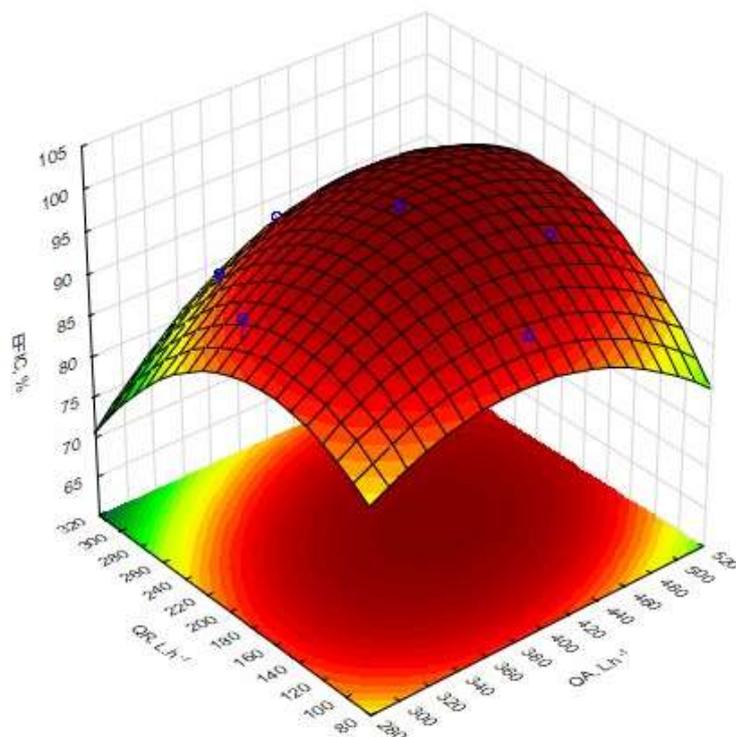
Foram elaboradas figuras de MSR para o FPSI-CS. A justificativa para tais figuras foi a interpretação e ilustração do comportamento dos parâmetros relacionados na Tabela 11. Para isto avaliou-se a influência de parâmetros importantes para a operação do flutuador, com consequente obtenção de condições operacionais, a fim de melhorar a remoção de óleos e graxas. A Figura 26 apresenta um gráfico envolvendo a eficiência de remoção de óleos e graxas pela vazão de reciclo (Q_R) em função da vazão do efluente (Q_A). Neste, observou-se:

- Valores intermediários de vazão de reciclo (204 L.h⁻¹) associado a uma baixa vazão de alimentação (296 L.h⁻¹), levam a uma alta eficiência de remoção (94,09%). No entanto, se elevarmos a vazão de reciclo ao valor máximo (309 L.h⁻¹) teremos uma redução na eficiência de remoção (89,04%), acarretando uma diluição no sistema;

- Valores intermediários da vazão de alimentação (402 L.h⁻¹) associados a uma baixa recirculação (98 L.h⁻¹), aumenta a eficiência remoção (89,69%). Porém, ao elevar a vazão de alimentação a valores máximos (507 L.h⁻¹) teremos uma eficiência de remoção ainda maior (94,2%), acarretando saturação no sistema;
- Valores máximos das vazões de reciclo e alimentação (309 L.h⁻¹) e (507 L.h⁻¹) respectivamente, nos levam a observar uma eficiência de remoção da ordem de (89,58%). No entanto, valores mínimos de (98 L.h⁻¹) elevam a eficiência (93,69%). Enquanto os valores mínimos para a vazão de alimentação (296 L.h⁻¹) não se mostram relevantes quanto a eficiência de remoção (94,09%);
- Valores intermediários de (204 L.h⁻¹) e (402 L.h⁻¹) levam a uma máxima eficiência no sistema (> 99%);
- O modelo matemático obtido foi:

$$Y = 6,1 - 0,00054 \cdot X_2^2 + 0,38 \cdot X_2 - 0,00077 \cdot X_3^2 + 0,144 \cdot X_3 + 0,000378 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (22)$$

Figura 26 – Eficiência em função das vazões de reciclo e efluente no FPSI-CS



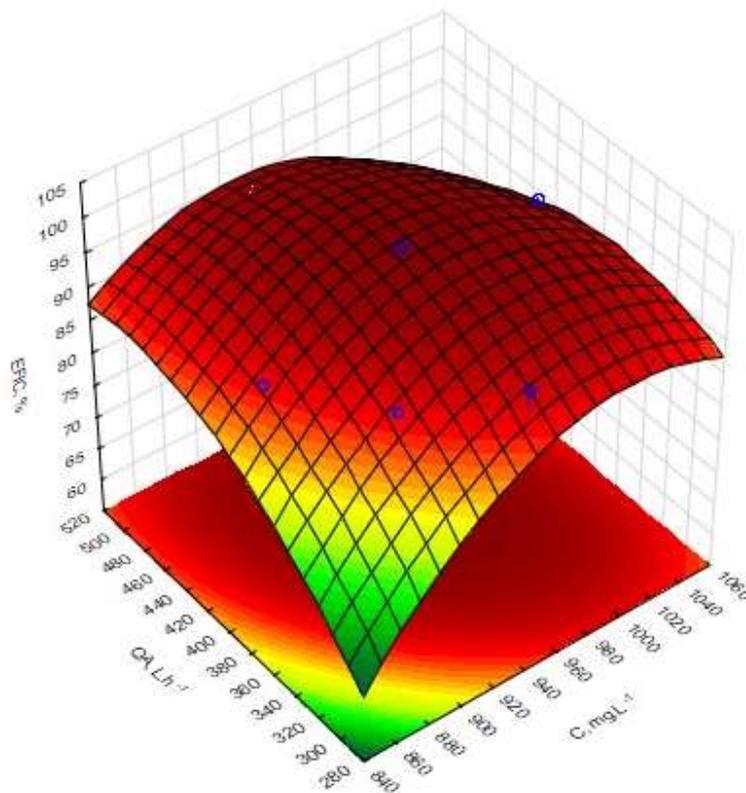
Fonte: O Autor (2022)

A Figura 27 apresenta o gráfico envolvendo a eficiência de remoção de óleos e graxas pela concentração (C) em função da vazão do efluente (Q_A) no FPSI. Neste, observou-se:

- Valores mínimos de concentração (900 mg.L⁻¹) e vazão de alimentação (336 L.h⁻¹), leva a uma baixa eficiência (79,5%), ocasionando diluição no sistema;
- Valores intermediários de concentração (950 mg.L⁻¹) e vazão de alimentação (402 L.h⁻¹) apontam para uma alta eficiência (> 99%). No entanto, ao se elevar os valores de Q_A ao máximo (507 L.h⁻¹), mantendo a concentração a valores intermediários (950 mg.L⁻¹), verifica-se uma redução da eficiência (94,2%);
- Valores baixos de vazão de alimentação (296 L.h⁻¹) e intermediários de concentração (950 mg.L⁻¹), há redução da eficiência de remoção (94%), sinalizando indícios de diluição por motivo da redução da Q_A;
- O modelo matemático obtido foi:

$$Y = -1146,7 - 0,00099 \cdot X_1^2 + 2,15 \cdot X_1 - 0,00054 \cdot X_2^2 + 1,02 \cdot X_2 - 0,000589 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (23)$$

Figura 27 – Eficiência em função da concentração e vazão de alimentação no FPSI-CS



Fonte: O Autor (2022)

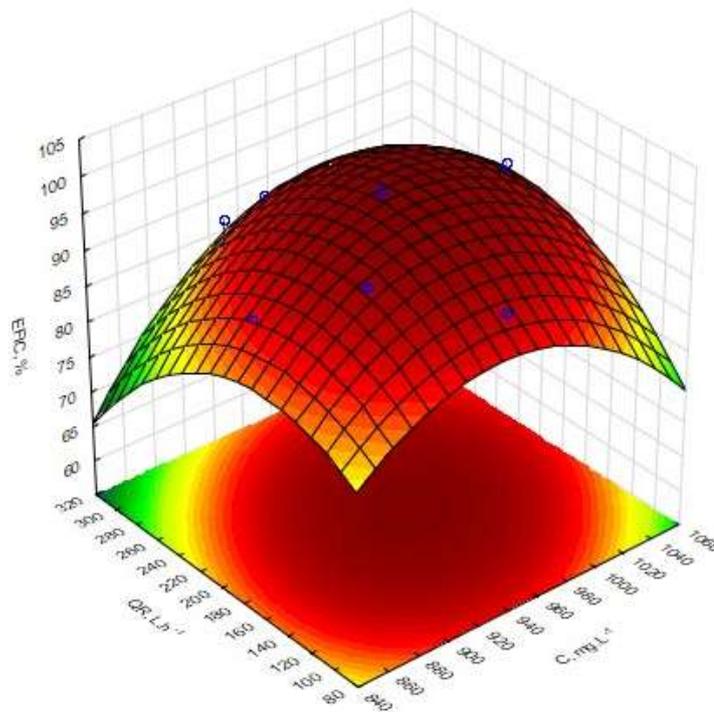
A Figura 28 apresenta o gráfico envolvendo a eficiência de remoção de óleos e graxas pela concentração (C) em função da vazão de reciclo (Q_R) no FPSI. Neste, observou-se:

- Valores intermediários de concentração (950 mg.L⁻¹) e vazão de reciclo (204 L.h⁻¹), leva a uma melhor situação, ou seja, melhor eficiência (> 99%);
- Valores máximos de concentração (1000 mg.L⁻¹) e baixa vazão de reciclo (150 L.h⁻¹), leva a uma baixa eficiência (92,4%);
- Valores intermediários da vazão de reciclo (204 L.h⁻¹) associados ao valor mínimos de concentração (865 mg.L⁻¹), leva a uma redução na eficiência de remoção (89,7%), acarretando diluição no sistema;
- Valores máximos de concentração (1000 mg.L⁻¹) e vazão de reciclo (276 L.h⁻¹), leva a uma redução da eficiência de remoção (90,03%). Porém, essa redução não é significativa quando comparada ao cenário anterior;
- O modelo matemático obtido foi:

$$Y = -758,7 - 0,00099 \cdot X_1^2 + 1,81 \cdot X_1 - 0,00077 \cdot X_3^2 - 1,66 \cdot X_3 + 0,000486 \cdot X_1 \cdot X_3$$

(24)

Figura 28 - Eficiência em função da concentração e vazão de reciclo no FPSI-CS



Fonte: O Autor (2022)

4.3 PLANILHA DE FLUXO DE CAIXA E INDICADORES ECONÔMICOS

Nesta etapa, foi desenvolvida uma planilha (Tabela 12) com fluxos de caixa para elaboração do EVTE correspondente à instalação do FPSI-CS na indústria de produtos de limpeza (Tabela 13). Assim, foi observado as peculiaridades da referida empresa de produtos de limpeza que presta um grande serviço ao meio ambiente, ao reaproveitar o óleo residual de frituras para produzir sabão em barra. Todas as entradas e saídas de recursos financeiros, por um período de 10 anos, encontram-se na referida planilha apresentada a seguir. A presente planilha, apresenta resultados aplicados na obtenção de valores para VPL, TIR e *Payback* Descontado relativos às condições de viabilidade econômica do investimento na instalação do Cabeça de Série na indústria química de produtos de limpeza. O FPSI-CS instalado, apresentou-se economicamente viável, com um tempo de retorno do investimento (*Payback* Descontado) de cerca de 1,84 ano, associado a um VPL igual a R\$334.821,76 positivo e uma TIR de 27,79%. A viabilidade do investimento foi constatada tanto pelo $VPL > 0$, quanto pela TMA/SELIC de 7,50%.

Tabela 13 - Entradas e saídas de recursos financeiros

VIABILIDADE ECONÔMICA DO FPSI-CS												
ITEM	ANO											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Investimento:	-137.983,84											
Obras Civis	16.000,00											
Tanques	8.000,00											
Bombas	250,00											
Quadro elétrico auxiliar	5.000,00											
Obras Cíveis Ortogonal	18.234,71											
Obras Maciônica DB	70.000,00											
Obras Elétricas/Vilha	12.186,63											
Revestimento Epóxi	8.312,50											
	-137.983,84											
Fatores e Taxas Econômicas												
Previsão de IPCA pelo Banco Central		7,58%	3,98%	3,25%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	
Previsão da taxa Selic		7,63%	7,75%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	
Parâmetros do Fluxo de Caixa												
Lucro sem IRPJ		47665,96	43429,05	51006,26	52526,04	54101,82	55724,87	57396,62	59118,52	60892,07	62718,83	
Taxa de Depreciação (10%)		10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	10067,13	
Lucro líquido		37598,82	33361,92	40939,13	42458,90	44034,68	45657,74	47329,48	49051,38	50824,94	52651,70	
IRPJ/CSLL (34%)		12783,60	13383,05	13919,30	14436,03	14971,79	15523,63	16092,02	16677,47	17280,48	17901,58	
Fluxo de Caixa		#####	-61023,10	-20083,98	22374,82	66409,61	112067,35	159396,83	208448,21	259273,15	311924,85	
Fluxo de Caixa Descontado		93381,41	52805,28	16166,81	16754,36	46258,19	72615,33	96077,22	116877,38	135232,59	151644,05	
Saldo (R\$)		-44602,43	8202,85	24369,66	41124,02	87382,21	159997,53	256074,76	372952,13	508184,73	659528,77	
Receitas:												
R01 - Disposição de resíduos (R\$)		53840,49	55983,34	57802,80	59536,88	61322,99	63162,68	65057,56	67009,29	69019,57	71090,15	
R03 - Reuso de água (R\$)		52440,00	54527,11	56293,24	57988,22	59727,87	61519,70	63365,29	65266,25	67224,24	69240,37	
		1400,49	1456,23	1503,56	1548,66	1595,12	1642,98	1692,27	1743,03	1795,33	1849,19	
Custos:												
C01 - Energia Elétrica		6174,53	6554,29	6796,54	7010,85	7221,17	7437,81	7660,94	7890,77	8127,49	8371,32	
C02 - Mão de Obra		3722,53	4004,70	4164,09	4293,42	4428,41	4561,26	4698,10	4839,04	4984,21	5133,74	
C03 - Manutenção		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
C04 - Análises Químicas		1000,00	1039,80	1073,53	1105,80	1138,38	1173,14	1208,34	1244,59	1281,93	1320,38	
		1452,00	1509,79	1558,86	1605,62	1653,79	1703,41	1754,51	1807,14	1861,36	1917,20	
TMA/Selic	7,50%											
VPL	R\$334.821,76											
TIR	27,79%											
PAYBACK DESCONTADO (anos)	1,84											

Fonte: O Autor (2022)

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A seguir, são apresentadas as conclusões do trabalho e perspectivas para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

O acompanhamento das etapas de fabricação dos produtos que se utilizaram do óleo residual de fritura, envolvendo o processo de geração do efluente a ser tratado e sua quantificação, com relação ao teor de óleos e gorduras, foi uma etapa primordial do trabalho.

Assim, neste trabalho, foi concebido, instalado e testado preliminarmente um protótipo Cabeça de Série, para ser utilizado no tratamento de águas oleosas por meio da técnica de flotação por pré-saturação induzida - FPSI. Em decorrência do contato íntimo entre microbolhas e gotículas de óleo, promovido internamente por meio da bomba geradora de microbolhas, o equipamento apresenta como uma de suas principais vantagens a redução da etapa de floculação em sistemas de flotação, como é convencionalmente esperada.

Os resultados da aplicação do DCCR se mostraram coerentes, para validação de um modelo de previsão com um intervalo de confiança de 95%. A correlação entre os dados experimentais e os valores previstos pelo modelo foi satisfatória ($R = 92,2\%$). O teste F de Fisher revelou que o modelo foi estatisticamente significativo e preditivo com um erro experimental inferior a 0,1%. Dessa forma pode-se afirmar que para um teor de óleos e graxas de 950 mg.L^{-1} na alimentação do flotador, eficiências da ordem de 99% foram obtidas para uma razão de reciclo de 0,51.

Os resultados obtidos, através da metodologia de superfície de resposta (MSR), para valores intermediários das variáveis independentes ($C = 950 \text{ mg.L}^{-1}$; $Q_A = 402 \text{ L.h}^{-1}$; $Q_R = 204 \text{ L.h}^{-1}$), demonstraram uma melhor eficiência de remoção de óleos e graxas ($> 99\%$) no FPSI.

A elaboração de um estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE), mostrou resultados significativos, economicamente viável e com *Payback* descontado de aproximadamente 2 anos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entre as sugestões de trabalhos futuros para o sistema de flotação por pré-saturação induzida (FPSI) estão:

- Aquisição e implantação de um sistema mais aperfeiçoado com um sensor on-line de medição de teor de óleos e graxas, para se monitorar as condições e parâmetros operacionais;
- Estudo para realizar, o mais eficiente possível, a correção do mecanismo de transferência entre o decantador e o FPSI. Visto que o sistema atual foi desenvolvido para operar com 1200 L.h^{-1} , porém só pode trabalhar com 600 L.h^{-1} por risco de transbordamento. Sendo, portanto, um ponto crítico do processo.

REFERÊNCIA

ABDEL-SHAFY, H.I.; MANSOUR, M.S.M.; EL-TOONY, M.M. Integrated treatment for oil free petroleum produced water using novel resin composite followed by microfiltration. **Separation and Purification Technology**, v.234, p.116058, 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT - NBR 13348/1995. **Banho residual de efluente líquido – Determinação do teor de óleos e graxas totais, minerais e vegetais**. Rio de Janeiro/RJ. 1995

ALMEIDA, D.G.; LUNA, J.M.; SILVA, I.A.; BRASILEIRO, P.P.F.; SARUBBO, L.A. Biosurfactant from *Pseudomonas cepacia* CCT 6659 as alternative collector in dissolved air flotation system for soap and detergent industry effluent treatment. **Chemical Engineering Transactions**, v.74, p.361-366, 2019. ISBN 978-88-95608-71-6, ISSN 2283-9216. Doi:10.3303/cet1974061

ALMOJLY, A.; JOHNSON, D.; OATLEY-RADCLIFFE, D.L.; HILAL, N. Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v.26, p.17-27, 2019. Doi:10.1016/j.jwpe.2018.09.004

BARBOSA, A.B.; SILVA, R.R. Xampus. Química e Sociedade. **Revista Química Nova na Escola**, n.2, 1995.

BEEBY, J.P.; NICOL, S.K. Concentration of oil-in-water emulsion using the air-sparged hydrocyclone. **Filtration & Separation**, v.30, n.2, p.141-146, 1993. Doi:10.1016/0015-1882(93)80112-A

BENETTI, A.D. Water reuse: issues, technologies, and applications. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.13, n.3, p.247-248, 2008. ISSN 1413-4152, e-ISSN 1809-4457. Doi:10.1590/S1413-41522008000300001

BENNETTI, G.F. The removal of oil from wastewater by air flotation: a review. **Critical Reviews in Environmental Control**, v.18, n.3, p.189-253, 2009. Doi:10.1080/10643388809388348

BETSY, K.J.; MARI JILU, RESHMA FATHIMA.; VARKEY, T. Determination of alkali content & total fatty matter in cleansing agents. **Asian Journal of Science and Applied Technology**, v.2, n.1, p.8-12, 2013. ISSN 2249-0698

BEYCHOCK, M.R. **Aqueous wastes from petroleum and petrochemical plants**. 1967. Wiley, New York/NY

BORSATO, D.; MOREIRA, I.; GALÃO, O.F. "**Detergentes naturais e sintéticos: um guia técnico**", ed. 5, Universidade Estadual de Londrina, 2004

BOX, G.E.P.; WILSON, K.B. **Sobre a obtenção experimental de condições ótimas**. In: Kotz, S.; Johnson, N.L. (Eds) *Descobertas em Estatística*. Série Springer em Estatística. Springer, Nova York/NY. 1992. ISBN 978-0-387-94039-7. Doi:10.1007/978-1-4612-4380-9_23

BRASIL **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente** (CONAMA), Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, p.58-63, Resolução no 357, de 17 de março de 2005

BRASIL. Resolução N° 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, N° 92, p.89, de 16 de maio de 2011

BRUTON, D.J. **Waste cooking oil-to-biodiesel conversion for space heating applications**. Thesis - Rochester Institute of Technology, 170p., 2014

BU, X.; XIE, G.; PENG, Y.; GE, L.; NI, C. Kinetics of flotation. Order of process, rate constant distribution and ultimate recovery. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v.53, n.1, p.342-365, 2017. ISSN 1643-1049 (print), ISSN 2084-4735 (online). Doi:10.5277/ppmp170128

CAMLOFFSKI, R. **Análise de investimentos e viabilidade financeira das empresas**. São Paulo: Atlas, 2014.

CAMPOS, W.K.S.; BUARQUE, F.S.; MACÊDO JÚNIOR, R.O.; SILVA, D.P.; RUZENE, D.S. **Estudos sobre as principais tecnologias para tratamento da água produzida**. Cadernos de Graduação-Ciências exatas e tecnológicas, Aracajú/SE, v.1, n.15, p.141-152, 2012

CHEN, B.; YANG, S.; CAO, Q.; QIAN, Y. Life cycle economic assessment of coal chemical wastewater treatment facing the ‘Zero liquid discharge’ industrial water policies in China: Discharge or reuse? **Energy Policy**, v.137, 2020. Doi:10.1016/j.enpol.2019.111107

CHONWATTANA, W.; PANJAPORNPON, C.; TAWAI, A.; DECHAKUPT, T. Model-based estimation and control of interface level in a two-phase vertical decanter: A case study of palm-oil/water system. **Computers & Chemical Engineering**, v.108, p.372-381, 2018. Doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.022

COLIC, M.; MORSE, W.; HICKS, J.; LECHTER, A.; MILLER, J.D. A case study of fish processing plant wastewater treatment. **Water Practice**, v.2, n.2, p.1-11, 2007. Doi:10.2175/193317708X293133

COLOMBET, D.; LEGENDRE, D.; TUTTLIES, U.; COCKY, A.; GUIRAUD, P.; NIEKEN, U.; GALINAT, S.; DANIEL, C. On single bubble mass transfer in a volatile liquid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 125, p. 1144–1155, 2018. Doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.149

COMERLATO, F. **A baleia como recurso energético no Brasil**. In: Simpósio internacional de história ambiental e migrações. Anais Simpósio Internacional de História Ambiental E Migrações. Florianópolis: UFSC., p.1119-1138, 2010

CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução 357/2005, 2005

CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução 430/2011, 2011

CRISPIM, S.C.L. **Remoção de cálcio (II) em solução aquosa por meio de carvões ativadas submetidos a tratamentos superficiais**. Tese de Doutorado em Química Analítica – Universidade Federal da Paraíba-UEPB, 118p., 2009

DE RENZO, D.J. **Pollution control Technology for industrial wastewaters**. 1981. Noyes data corp., Park Ridge, N.J.

DEZOTTI, M. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Série Escola Piloto de Engenharia Química – COPPE/UFRJ, v.5, 360p., Rio de Janeiro: E-papers, 2008. ISBN 978-85-7650-173-2

DHANARAJANA, G.; PERVEENA, P.; ROY, A.; DE, S.; SEN, R. **Performance Evaluation of Biosurfactant Stabilized Microbubbles in Enhanced Oil Recovery**. 2018. Disponível em: < <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/504431v1.full.pdf>>, acesso em 22/09/2021. Doi:10.1101/504431

DICKHOUT, J.M.; MORENO, J.; BIESHEUVEL, P.M.; BOELS, L.; LAMMERTINK, R.G.; DE VOS, W.M. Produced water treatment by membranes: A review from a colloidal perspective. **Journal Colloid Interface Science**, v.487, p.523-534, 2017. Doi:10.1016/j.jcis.2016.10.013

DORNELAS, J.C.A. **Transformando ideias em negócios**. 2 Ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2005

DOVI, V.G., FRIEDLER, F., HUISINGH, D., KLEMES, J.J. Cleaner energy for sustainable future. **Journal of Cleaner Production**, v.17, n.10, p.889-895, 2009. Doi:10.1016/j.jclepro.2009.02.001

DUMORE, N.S.; MUKHOPADHYAY, M. Removal of oil and grease using immobilized triacylglycerin lipase. **Internatiponal Biodeterioration & Biodegradation**, v.68, p. 65-70, 2012. Doi:10.1016/j.ibiod.2011.12.005

EFTEKHARDADKHAH, M.; AANESEN, S.V.; RABE, K.; ØYE, G. Oil Removal from Produced Water during Laboratory- and Pilot-Scale Gas Flotation: The Influence of Interfacial Adsorption and Induction Times. **Energy Fuels**, v.29, n.11, p.7734-7740, 2015

ELBAZ, A. M.; GANI, ABDUL; HOURANI, NADIM; ABDUL, HAMID EMWAS; S., MANI SARATHY; ROBERTS, W. L. TG/DTG, FT-ICR Mass Spectrometry, and NMR Spectroscopy Study of Heavy Fuel Oil. **Energy and Fuels**, v.29, n.12, p.7825-7835, 2015

EL-GOHARY, F.; TAWFIK, A.; MAHMOUD, U. Comparative study between chemical coagulation/precipitation (C/P) versus coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) for pretreatment of personal care products (PCPs) wastewater. **Desalination**, v.252, p.106-112, 2010. Doi:10.1016/j.desal.2009.10.016

ELLIS, M.M.; FISCHER, P.W. Clarifying oilfield and refinery wasters by gas flotation, **Journal of Petroleum Technology**, v.25, n.4, p.426-430, 1973. Doi:10.2118/3198-PA

FERNANDES, T.; ALEXANDRE B.G.; SILVA, N.J. **A eletrofloculação como Tecnologia para o Tratamento de Efluentes**. Beau Bassin Mauritius: Novas Edições Acadêmicas International Book Market Service LTD. v.1, 97p., 2017

FILHO, A.A.P.S.; CHAPRÃO, M.J.; CAMPELLO FILHO, A.A.P.; BRASILEIRO, P.P.F.; ARAÚJO, G.P.; SANTOS, L.B.; RUFINO, R.D.; SANTOS, V.A.; SOARES DA SILVA, R.C.F.; SARUBBO, L.A. Application of a Biosurfactant as a Collector in Flotation Chamber with Induced Pre-saturation in Bench Scale for Oil Water Treatment. **Chemical Engineering**

Transactions, v.86, p.979-984, 2021. ISBN 978-88-95608-84-6, ISSN 2283-9216.
Doi:10.3303/CET2186164

FILHO, S.; MIRANDA, A.; SILVA, T. Environmental and techno-economic considerations on biodiesel production from waste frying oil in São Paulo city. **Journal of Cleaner Production**, v.183, p.1034-1042, 2018. ISSN 0959-6526. Doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.199

FILHO, S.T.; SENA, M.F.M.; SILVA, E.R.; CABRAL, G.B.; MARANHÃO, F.S. Sistema de análise estequiométrica para produção de sabão a partir do óleo vegetal residual: uma estratégia para redução do impacto ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental-REGET**, v.15, n.15, p.3019-3025, 2013. ISSN 2236-1170.
Doi:10.5902/2236117010814

FREIRE, P.C.M.; MANCINI-FILHO, J.; FERREIRA, T.A.P.C. Principais alterações físico-químicas em óleos e gorduras submetidos ao processo de fritura por imersão: regulamentação e efeitos na saúde. **Revista de Nutrição**, v.26, n.3, p.353-358, 2013. ISSN 1415-5273.
Doi:10.1590/S1415-52732013000300010

FREITAS, B.G.; BRIYO, J.G.M.; BRASILEIRO, P.P.F.; RUFINO, R.D.; LUNA, J.M.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Formulation of a commercial biosurfactant for application as a dispersant of petroleum and by-products spilled in oceans. **Frontiers in Microbiology**, v.7, n.401, p.1646, 2016. Doi:10.3389/fmicb.2016.01646

GARCÍA-MARTÍNEZ, F.J.; PÉREZ-SANCHES, P.; RANCAÑO-PÉREZ, A. **Manual de operación y mantenimiento de EDARs em pequenas poblaciones**, Klein. 2012. ISBN 978-84-615-7343

GEBHARDT, J.E.; MANKOSA, M.J.; HUBRED, G.L. Removal of oil from produced water by microcell TM column flotation, Summer National Meeting-American Institute of Chemical Engineers, Denver, CO, n.29b, p.14-17, 1994

GHARAI, M.; VENUGOPAL, R. Modeling of flotation process-An overview of different approaches. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v.37, n.2, p.120-133, 2016. Doi:10.1080/08827508.2015.1115991

GOFFI, A.S.; TROJAN, F.; DE LIMA, J.D.; LIZOT, M.; THESARI, S.S. Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems. **Water Science and Technology**, v.78, n.12, p.2518-2531, 2018. Doi:10.2166/wst.2019.012

GOPALRATNAM, V.C.; BENNETT, G.F.; PETERS, R. The simultaneous removal of oil and heavy metals from industrial wastewater by joint precipitation and air flotation. **Environmental Progress**, v.7, n.2, p.84-92, 1988. Doi:10.1002/ep.3300070208

GREENHALGH, A.A.M.S.; CONTE, A.C.; FIDELIS, A.C.; ROSINHA, R.O. **Gestão de negócio para projetos de P&D**. Brasília, DF: Embrapa, 2017, 58p. ISSN 1983-0610

HAN, M.; ZHANG, J.; CHU, W.; CHEN, J.; ZHOU, G. Research Progress and Prospects of Marine Oily Wastewater Treatment: A Review. **Water**, v.11, n.12, p.2517, 2019.
Doi:10.3390/w11122517

HARBORT, G.J.; JACKSON, B.R.; MANLAPIG, E.V. Recent advances in Jameson flotation cell technology. **Minerals Engineering**, v.7, n.2-3, p.319-332, 1994 Doi:10.1016/0892-6875(94)90073-6

HENAUTH, R.C.S.; VASCONCELOS, R.S.; MOURA, A.E.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. **Produção de microbolhas para a flotação por ar induzido**. In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014, Santa Catarina/SC. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2, p.8469-8476, São Paulo: Blucher, 2015. Doi: 10.5151/chemeng-cobeq2014-1281-20108-147896

HENAUTH, R.C.S.; VASCONCELOS, R.S.; MOURA, A.E.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. Microbubble generation with the aid of a centrifugal pump. **Chemical Engineering & Technology**, v.40, n.1, p.138-144, 2017. Doi:10.1002/ceat.201500301

HENAUTH, R.C.S.; VASCONCELOS, R.S.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A.; BENACHOUR, M. **Tecnologia para tratamento de efluente industrial de caráter oleoso através de um flotor**. In: Arminda Sacconi Messias; Lílian Costa. (Org.). Rios urbanos limpos: possibilidades e desafios. ed. 9, Recife: FASA, 2017, v.1, p.1100-1108

HENAUTH, R.C.S.; VASCONCELOS, R.S.; MOURA, A.E.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. **Nova tecnologia de produção de microbolhas**. In: Arminda Sacconi Messias. (Org.). Tratamento de Água: qualidade, economia e sustentabilidade. ed. 8, Recife: Fasa, 2015, v.1, p.582-593

HERNÁNDEZ, E.A.A. **Management of produced water from the oil and gas industry: treatment, disposal and beneficial reuse**. Thesis (Degree of M.Sc. in Petroleum Engineering, Politecnico di Torino, 66p., 2021

HOLDICH, R.G.; CUMMING, I.W.; SMITH, I.D. Crossflow microfiltration of oil in water dispersions using surface filtration with imposed fluid rotation. **Journal Membrane Science**, v.143, n.1-2, p.263-374, 1998. Doi:10.1016/s0376-7388(98)00023-4

HOSNY, R.; FATHY, M.M.; RAMZI, M.; ABDEL MOGHNY, T.H.; DESOUKY, S.E.M.; SHAMA, S.A. Treatment of the oily produced water (OPW) using coagulant mixtures, **Egyptian Journal of Petroleum**, v.25, n.3, p.391-396, 2016. Doi:10.1016/j.ejpe.2015.09.006

HUBER, P.; ROUSSET, X.; ZENO, E.; VAZHURE, T. Parameters of deinking efficiency in an industrial flotation bank. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.50, n.7, p.4021-4028, 2011. Doi:10.1021/ie102271e

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2018. Disponível em jconline.ne10.uol.com.br/canal/mundo/brasil/noticia/2018/08/29/recife-tem-1637834-de-habitantes-diz-ibge-brasil-tem-208-mi-352762.php. Acessado em 23/01/2019

JAMALY, S.; GIWA, A.; HASAN, S. W. Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. **Journal of Environmental Sciences**, v.37, p.15-30, 2015. Doi:10.1016/j.jes.2015.04.011

KHAN, F. A.; HISHAM, S.; GHASEMI, M. Oil field produced water recovery and boosting the quality for using in membrane less fuel cell. **SN Applied Sciences**, v.1, n.6, p.510, 2019. Doi: 10.1007/s42452-019-0523-3

KÖRBAHTI, B.K.; ARTUT, K. Electrochemical oil/water demulsification and purification of bilge water using Pt/Ir electrodes. **Desalination**, v.258, n.1-3, p.219–228, 2010. Doi: 10.1016/j.desal.2010.03.008

KOWALCZUK, P.B., DRZYMALA, J. Some remarks on attachment of a gas bubble to another phase both immersed in a water. **Physicochemical Problems Mineral Process.** v. 52, n. 1, p. 147-154, 2016. ISSN 1643-1049, e-ISSN 2084-4735. Doi:10.5277/ppmp160113

KROFTA, M.; WANG, L.K. **Flotation Engineering**, 1st. Edn. Technical manual n. lenox/1-06-2000/368. 2000. Lenox Institute of water technology, Lenox, MA

KUNDUA, P.; MISHRA, I.M. Treatment and reclamation of hydrocarbon-bearing oily wastewater as a hazardous pollutant by different processes and technologies: a state-of-the-art review. **Chemical Engineering & Technology**, v.35, n.1, p.73-108, 2019. Doi:10.1515/revce-2017-0025

KUMAR, M.P.; KUMAR, K.V.; KUMAR, V. Response surface methodology – a review. **International Journal for Scientific Research & Development**, v.8, n.7, p.558-565, 2020. ISSN 2321-0613

KYZAS, G.; MATIS, K. Flotation in water and wastewater treatment. **Processes**, v.6, n.8, p.116, 2018. Doi:10.3390/pr6080116

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size. **Water Research**, v.68, p.262-272, 2015

LARSEN, I.; WEINSCHUTZ, R.; KOLICHESKI, M. B. Logística reversa dos óleos residuais em Curitiba: estudo de caso em Santa Felicidade e projeto de educação à reciclagem. **Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v.8, n.1, p.973-993, 2019. Doi:10.19177/rgsa.v8e12019973-993

LEE, K. H.; KIM, H.; KUK, J.W.; CHUNG, J.D.; PARK, S.; KWON, E.E. Micro-bubble flow simulation of the dissolved air flotation process for water treatment using Computational Fluid Dynamics. **Environmental Pollution**, v.256, 112050, 2020. Doi:10.1016/j.envpol.2019.01.011

LI, P.; TSUGE, H. Water treatment by induced air flotation using microbubbles. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v.39, n.8, p.896-903, 2006. Doi:10.1252/jcej.39.896

LIEW, W.L.; KASSIM, M.A.; MUDA, K.; LOH, S.K.; AFFAM, A.C. Conventional methods and emerging wastewater polishing technologies for palm oil mill effluent treatment: A review. **Journal Environmental Management**, v.149, p.222-235, 2015. Doi:10.1016/j.jenvman.2014.10.016

LIMA, J.D.; TRENTIN, M.; OLIVEIRA, A.G.; BATISTUS, D.R.; SETTI, D. A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects. **International Journal of Engineering Management and Economics**, v.5, p.19-34, 2015. Doi:10.1504/IJEME.2015.069887

- LINS, I.X.; BENACHOUR, M.; MOURA, F.M. **Contribuição na melhoria do processo de tratamento do óleo de fritura em operação em indústria domissanitária.** IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental São Bernardo do Campo/SP, 2018
- LINS, J.M.; SANTOS, L.B.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Industrial reuse of water from chemical washing of residual frying oil. **Chemical Engineering Transaction**, v.57, p.523-528., 2017. ISBN 978-88-95608- 48-8, ISSN 2283-9216. Doi:10.3303/CET1757088
- LUFT, J.; BISOGNIN, R.P.; CLASEN, B.E.; SILVA, D.M.; WEBER, F.H.; WEIRICH, H.G. Tratamento físico-químico de efluentes gerados na proteção superficial de aço carbono em indústria de peças agrícolas e automotivas. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental – RG&SA.** Florianópolis/SC, v.7, n.2, p.540-559, 2019. Doi:10.19177/rgsa.v7e22018540-559
- MANOJKUMA, N.; MUTHUKUMARAN, M.; SHARMILA, G. A comprehensive review on the application of response surface methodology for optimization of biodiesel production using different oil sources. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, v.34, n.3, p.198-208, 2022. Doi:10.1016/j.jksues.2020.09.012
- MATHEWS, S.; GOWRILEKSHMI, R. Solid waste management using effective microorganism (EM) technology, **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v.5, n.7, p.804-815, 2016. ISSN 2319-7706. Doi:10.20546/ijcmas.2016.507.093
- MELLO, V.M; OLIVEIRA, G.V. SUAREZ, P.A.Z. Turning used frying oil into a new raw material to printing inks. **Journal Brazilian Chemistry Society**, v.24, n.2, p.1-6, 2013. ISSN 0103-5053. Doi:10.5935/0103-5053.20130040
- MENEZES, C.T.B.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Evaluation of biosurfactants for removal of heavy metal ions from aqueous effluent using flotation techniques. **International Review of Chemical Engineering** (Testo Stampato), v.4, p.156-161, 2012
- MIGUEL, A.; FRANCO, D. Logística reversa do óleo de cozinha usado. **Revista Científica-FAESP/Faculdade Anchieta**, n.9, p.3-13, 2014.
- MITTAL, P.; JANA, S.; MOHANTY, K. Synthesis of low-cost hydrophilic ceramic–polymeric composite membrane for treatment of oily wastewater. **Desalination**, v.282, p.54-62, 2011. Doi:10.1016/j.desal.2011.06.071
- MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. 6th edition. **John Wiley & Sons, Inc.** 656p., 2005. ISBN 0471661597
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, C.G. **Applied statistics and probability for Engineers.** 4^a edição, LTC, 496p., 2009. ISBN 9788521616641
- MYERS, R.M.; MONTGOMERY, C.D.; ANDERSON-COOK, C. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 3th edition. **John Wiley & Sons, Inc.** 704p., 2009. ISBN 978-0-470-17446-3
- NEETHLING, S.J.; BRITO-PARADA, P.R.; HADLER, K.; CILLIERS, J.J. The transition from first to zero order flotation kinetics and its implications for the efficiency of large flotation cells. **Mineral Engineering**, v.132, p.149-161, 2019. Doi:10.1016/j.mineng.2018.11.039

NELSON, D.L.; COX, M.M. **Lehninger Principles of Biochemistry**. ed. 7, New York: W.H. Freeman, 2012. Doi:10.1007/978-3-662-08289-8

NETO, G.L.O. **Processo de separação água-óleo usando Sistema modular de membranas cerâmicas: modelagem avançada e simulação via CFD**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado), Campina Grande-PB, 115f., 2020

NGAMLERDPOKIN, K.; KUMJADPAI, S.; CHATANON, P.; TUNGMANEE, U.; CHUENCHUANCOM, S.; JARUWAT, P. Remediation of biodiesel wastewater by chemical and electro-coagulation: a comparative study. **Journal of Environmental Management**, v.92, n.10, p.2454-2460, 2011. Doi:10.1016/j.jenvman.2011.05.006

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. A short overview of the formation of aerated flocs and their applications in solid/liquid separation by flotation. **Minerals Engineering**, v. 39, p. 124-132, 2012. Doi:10.1016/j.minerj.2012.05.024

OLIVEIRA, H.A.; AZEVEDO, A.C.; ETCHEPARE, R.; RUBIO, J. Separation of emulsified crude oil in saline water by flotation with micro and nanobubbles generated by a multiphase pump. **Water Science & Technology**, v.76, n.10, p.9-10, 2017. Doi:10.2166 / wst.2017.441

OLIVEIRA, J.P.; ANTUNES, P.W.P.; MORDENTE, T.Z.; SANTOS, A.R.; PINOTTI, L.M.; CASSINI, S.T.A. Biodiesel production from scum of grease traps and sludge from septic tanks. **Clean Technologies Environmental Policy**, v.19, n.4, p.1231-237, 2016. e-ISSN 1618-9598. Doi:10.1007 / s10098-016-1308-7

ONYANGO, B.; COLEB, K.; WALKERC, E.; HOEGEMAND, C.; CLIFFORD-RATHERTE, C.; IBRAHIMF, M.; WHITWORTH, W. Exploiting economic potential for goat production: A case for Missouri and Arkansas. **Journal of Food Distribution Research**, v.46, n.1, p.50-53, 2014

OSAWA, C.C.; GONÇALVES, L.A.G.; MENDES, F.M. Avaliação dos óleos e gorduras de fritura de estabelecimentos comerciais da cidade de Campinas/SP. As boas práticas de fritura estão sendo atendidas? **Revista de Alimentos e Nutrição**, v.21, n.1, p.47-55, 2010. ISSN 0103-4235

PADAKI, M.; MURALI, R.S.; ABDULLAH, M.S.; MISDAN, N.; MOSLEHYANI, A.; KASSIM, M.A.; HILAL, N.; ISMAIL, A.F. Membrane technology enhancement in oil-water separation. A review. **Desalination**, v.357, p.197-207, 2015. Doi:10.1016/j.desal.2014.11.023

PAGAN, R.P.; SILVA, C.E.S.; MELLO, C.H.H. Projeto conceitual no processo de desenvolvimento de produtos eletroeletrônicos: estudo de caso em empresas incubadas. **Rev. Científica Eletônica de Engenharia de Produção**, v.13, n.3, ISSN 1676-1901. Doi:10.14488/1676-1901.v13i3.1402

PAINMANAKUL, P.; SASTARAVET, P.; LERSJINTANAKAMB, S.; KHAODHIAR, S. Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by Induced Air Flotation (IAF) process, **Chemical Engineering Research and Design**, v.88, ed.5-6, p.693-702, 2010. Doi:10.1016/j.cherd.2009.10.009

PAIXÃO, M.V.G.; BALABAN, R.C. Application of guar gum in brine clarification and oily water treatment. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.108, p.119-126, 2018. Doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.11.166

PICCININI, C.A. **Transferência de calor e massa II**. Apostila. Coleção principal de objetos de aprendizagem do Campus Porto Alegre, Porto Alegre/RS, 44p., 2013

PIKE, O.A.; O'KEEFE, S. **Caracterização de gordura**. In: Nielsen S. (ed) **Análise de Alimentos. Série de texto ciência alimentar**. Springer, Cap. 23, 2017. ISBN 978-3-319-45774-1 e-ISBN 978-3-319-45776-5. Doi:10.1007/978-3-319-45776-5_23

PINSKY, V.; KRUGLIANSKAS, I. Inovação tecnológica para a sustentabilidade: aprendizados de sucessos e fracassos. **Estudos Avançados**, v.31, n.90, p.107-126, 2017. ISSN 0103-4014, e-ISSN 1806-9592. Doi:10.1590/s0103-40142017.3190008

POLAT, M.; CHANDER, S. First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58, p.145-166, 2000. Doi:10.5277/ppmp18155

RADZUAN, M.R.A; BELOPE, M.A.A-B; THORPE, R.B. Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation. **Chemical Engineering Research and Design**, v.115, p.19-33, 2016. Doi:10.1016/j.cherd.2016.09.013

READETT, D.; CLAYTON, B. Cleaning hydrometallurgical liquor using jameson cells, In flotation plants: Are they optimized?. Editor D. Malhotra, **Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration**, Inc. Littleton, Colorado, Cap. 23, p.165-170, 1993

REFAAT, A.A. Different techniques for the production of biodiesel from waste vegetable oil. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v.7, p.183-213, 2010. ISSN 1735-1472, e-ISSN 1735-2630. Doi:10.1007/BF03326130

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de alimentos**. Editora Edgard Blücher LTDA, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, São Paulo, p.111-143 e p.169-173, 2001

ROCHA E SILVA, F.C.P.; ROCHA E SILVA, N.M.P.; SILVA, I.A.; BRASILEIRO, P.P.F.; LUNA, J.M.; RUFINO, R.D.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Oil removal efficiency forecast of a dissolved air flotation (fad) reduced scale prototype using the dimensionless number of Damköhler. **Journal Water Process Engineering**, v.23, p.45-49, 2018. Doi:10.1016/j.jwpe.2018.01.019

ROCHA E SILVA, F.C.P.; ROCHA E SILVA, N.M.P.; SILVA, I.A.; BRASILEIRO, P.P.F.; LUNA, J.M.; RUFINO, R.D.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Oil removal efficiency forecast of a dissolved air flotation (DAF) reduced scale prototype using the dimensionless number of Damköhler. **Journal of Water Process Engineering**, v.26, 2018. Doi:10.1016/j.jwpe.2018.01.019

RÔLA, A.K.K.; CASTRO, G.M.; SANTANA, H.F.; SOUZA, J.J.L.L.; SILVA, D.J. Avaliação da eficiência de coagulantes comerciais para aplicação em sistemas de tratamento de água. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, v.2, n.3, p.14-33, 2016

ROSA, J.J. **"Desenvolvimento de um novo processo de tratamento de águas oleosas - Processo FF"**. In: XIX Prêmio Jovem Cientista - Tema: Água - Fonte da Vida, 2003

ROSA, J.J.; SOUZA, M.L.D.; RODRIGUES, R.T.; RUBIO, J. Waste waters treatment by Non-conventional flotation. **Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and**

Clean Technology-REWAS'99, TMS-Inasmet. (Eds. L. Gaballah; J. Hager; R. Solozabal), San Sebastian, Espanha. Proceedings, p.2123-2132, 1999

SAINZ-SASTRE, J.A. **Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos e operaciones unitárias em depuração de águas residuales.** Colección EOI Medio Ambiente. Flotación por aire dissulto. Apuntes curso EOI. (Coruña – Espanha). Editado por Fundación EOI. 2007. ISBN 978-84-88723-58-1

SANTANA, C.R.; FREITAS, A.G.B.; SILVA, G.F.; PAIXAO, A.E.A.; OLIVEIRA, R.P.S. **Treatment of produced water: is a flotation viable process?.** Rio oil and gas, 2008. Expo and Conference, Rio de Janeiro/RJ, p.15-18, 2008

SANTANDER, M. **Separação de óleos emulsificados por flotação não convencional,** Tese de Doutorado em Minas, Metalúrgica e Materiais-Universidade Federal do Rio Grande do Sul/PPGEM - UFRGS, Porto Alegre/RS, 123f., 1998

SANTOS, D.K.; RUFINO, R.D.; LUNA, J.M.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Biosurfactants: multifunctional biomolecules of the 21st century. **International Journal of Molecular Sciences**, v.17, n.3, p.401, 2016. Doi:10.3390 / ijms17030401

SANTOS, L.B.; SOARES DA SILVA, R.C.F.; BRASILEIRO, P.P.F.; BALDOE, R.D.; SARUBBO, L.A.; SANTOS, V.A. Oily water treatment in a multistage tower operated under a novel induced pre-saturation process in the presence of a biosurfactant as collector. **Biotechnology Reports**, v.30, e00638, 2021. Doi:10.1016/j.btre.2021.e00638

SARUBBO, L.A.; LUNA, J.M.; RUFINO, R.D. Application of a biosurfactant produced in low-cost substrats in the removal of hydrophobic contaminants. **Chemical Engineering Transactions**, v.43, p.295-300, 2015. ISBN 978-88-95608-34-1, ISSN 2283-9216. Doi:10.3303/CET1543050

SATHTHASIVAM, J.; LOGANATHAN, K.; SARP, S. An overview of oil–water separation using gas flotation systems. **Chemosphere**, v.144, p.671-680, 2016. Doi:10.1016/j.chemosphere.2015.08.087

SEKMAN, E.; TOP, S.; USLU, E.; VARANK, G.; BILGILI, M.S. Treatment of oily wastewater from port waste reception facilities by electrocoagulation. **International Journal of Environmental Research**, v.5, n.4, p.1079-1086, 2011. ISSN 1735-6865. Doi:10.22059 / IJER.2011.466

SHAMMAS, N.K.; WANG, L.K. **Water engineering: hydraulics, distribution and treatment.** ed. 5, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA. 806p., 2016

SHAW, D.J. **Introduction to colloid and surface chemistry.** ed. 4, Butterworths-Heinemann, 320p., 2013. ISBN 978-07-50611-82-4, e-ISBN 978-00-80509-10-5

SILVA, B.G.; PUGET, F.P. Sabão de sódio glicerinado: produção com óleo residual de fritura. **Revista Enciclopédia Biosfera - Centro Científico Conhecer**, v.6, n.11, p.1-15, 2010

- SILVA, M.; SAD, L.; PEREIRA, R.; CORONA, J.; BASSANE, F. Study of the stability and homogeneity of water in oil emulsions of heavy oil. **Fuel**, v. 226, p.278-285, 2018. Doi:10.1016/j.fuel.2018.04.011
- SILVA, P.H.O.; JANNI, V. Relação da taxa mínima de atratividade no cenário econômico atual com a viabilidade econômica de projetos. **Revista Boletim do Gerenciamento**, n.25, p.68-75, 2021
- SILVA, R.C.F.S.; ALMEIDA, D.G.; RUFINO, R.D.; LUNA, J.M.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. **International Journal of Molecular Sciences**, v.15, p.12523-12542, 2014. Doi:10.3390 / ijms150712523
- SILVA, V.M.; DIAS, M.F.; MACEDO, P.F.; VILAS BOAS, S.R.; BOTELHO, P.S.; JOSÉ, C.I. Reciclagem de óleos residuais para a produção de sabão no município de Itapetinga-BA, **Revista Eletrônica de Extensão**, v.9, n.13, p.106-120, 2012. ISSN 1807-0221. Doi:10.5007/1807-0221.2012v9n13p106
- SILVESTRE, C.F. **Influência das condições operacionais em uma planta piloto de flotação por ar dissolvido (FAD)**. Universidade Estadual de Campinas/SP – Faculdade de Engenharia Química (Dissertação de Mestrado). 2018
- SONGHU, Y.; TONG, M.; WU, G. Destabilization of emulsions by natural minerals. **Journal of Hazardous Materials**, v.192, n.3, p.1882-1885, 2011. Doi:10.1016/j.hazmat.2011.06.047
- SOUZA, E.C.; VESSONI-PENNA, T.C.; SOUZA OLIVEIRA, R.P. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.89, p.88-94, 2014. Doi:10.1016/j.ibiod.2014.01.007
- SZCZERKOWSKA, S.; WIERTEL-POCHOPIEN, A.; ZAWALA, J.; LARSEN, E.; PRZEMYSŁAW, B. Kinetics of froth flotation of naturally hydrophobic solids with different shapes, **Minerals Engineering**, v. 121, p. 90-99, 2018. Doi:10.1016/j.mineng.2018.03.006
- TANUDJAJA, H.J.; HEJASE, C.A.; TARABARA, V.V.; FANE, A.G.; CHEW, J.W. Membrane-based separation for oily wastewater: A practical perspective. **Water Research**, v.156, p.347-365, 2019. Doi:10.1016/j.watres.2019.03.021
- TAVARES, J. Organizando o descarte. **Revista Biodieselbr**, São Paulo/SP, v.8, n.46, p.22-25, 2015
- TAYIM, H.A.; AL-YAZOURI, A.H. Industrial Wastewater Treatment Using Local Natural Soil in Abu Dhabi, U.A.E. **American Journal of Environmental Sciences**, v.1, n.3, p.190-193, 2005. ISSN 1553-345X
- WAN IKHSAN, S.N.; YUSOF, N.; AZIZ, F.; MISDAN, N. A review of oilfield wastewater treatment using membrane filtration over conventional technology. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v.21, n.3, p.643-658, 2017. ISSN 1394-2506
- WANG, L.K.; HUNG, Y-T.; SHAMMAS, N.K. **Handbook of environmental engineering**, series: Handbook of environmental engineering – Flotation technology, Humana Press, Totowa, New Jersey. v.12, 2010. ISBN 978-1-58829-494-4, e-ISBN 978-1-60327-133-2. Doi:10.1007/978-1-60327-133-2

WATANABE, Y. Flocculation and me. **Water Research**, v.114, p.88-103, 2017. Doi:10.1016/j.watres.2016.12.035

WOLDWMICHAEL, D.E.; HASHIM, F.M. Método de avaliação de conceito progressive para variantes de conceito geradas automaticamente. **MATEC Web de Conferências**, v.13, 2014. Doi:10.1051/mateconf/20141304007

WU, S.; WALLACE, S.; BRIX, H.; KUSCHK, P. Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. **Environmental Pollution**, v.201, p.107-120, 2018. Doi:10.1016/j.envpol.2015.03.006

YANG, T.; MA, Z.F.; YANG, Q.Y. Formation and performance 1381 of kaolin/MnO₂ bi-layer composite dynamic membrane for oily wastewater treatment: effect of solution conditions. **Desalination**, v.270, n.1-3, p.50-56, 2011. Doi:10.1016/j.desal.2010.11.019

YOON, R.H.; SONI, G.; HUANG, K.; PARK, S.; PAN, L. Development of a turbulent flotation model from first principles and its validation. **International Journal Mineral Process**, v. 156, p, 43-51, 2016. Doi:10.1016/j.minpro.2016.05.009

YU, L.; HAN, M.; HE, F. A review of treating oily wastewater. **Arabian Journal Chemistry**, v.10, n.2, p.S1913-S1922, 2017. Doi:10.1016/j.arabjc.2013.07.020

ZAHRAEE, S.M.; MEMARI, A.; REZAEI, G.; AFSHAR, J.; ROHANI, J.B.M. Teaching the design of experiment and response surface methodology using paper helicopter experiment. **Paper presented at 4th International Graduate conference on Engineering, Science and Humanity**, Johor Bahru, Malaysia, 2013