

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

DAVISON CAVALCANTE BARROS

**OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS E DE PROJETO DE UMA
COLUNA DE FLOTAÇÃO POR *AIRLIFT* UTILIZANDO TÉCNICAS DE
COMPUTAÇÃO FLUIDODINÂMICA**

**MACEIÓ
2019**

Davison Cavalcante Barros

Otimização das variáveis operacionais e de projeto de uma coluna de flotação por *airlift*
utilizando técnicas de computação fluidodinâmica

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Gomes Marinho

Coorientador: Prof. Dr. João Inácio Soletti

Maceió
2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

B277o Barros, Davison Cavalcante.

Otimização das variáveis operacionais e de projeto de uma coluna de flotação por *airlift* utilizando técnicas de computação fluidodinâmica / Davison Cavalcante Barros. – 2019.

72 f. : il. color.

Orientador: José Luis Gomes Marinho.

Co-orientador: João Inácio Soletti.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 68-72.

1. Fluidodinâmica computacional. 2. Flotação. 3. *Airlift*. 4. Águas residuais – Purificação. 5. Indústria petrolífera. I. Título.

CDU: 66.06:543.3

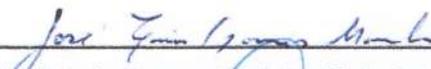
Davison Cavalcante Barros

**“Otimização das variáveis operacionais e de projeto de uma
coluna de flotação por *Airlift* utilizando técnicas de
computação fluidodinâmica”**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Alagoas, como requisito para a
obtenção do Título de Mestre em Engenharia
Química.

Aprovada em: Maceió, 03 de abril de 2019.

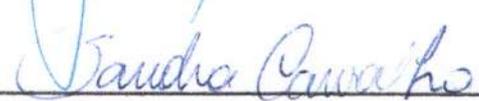
BANCA EXAMINADORA



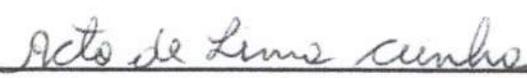
Prof. Dr. José Luis Gomes Marinho (Orientador – PPGEQ/UFAL)



Prof. Dr. João Inácio Solleti (Coorientador - PPGEQ/UFAL)



Prof.ª Dr.ª Sandra Helena Vieira de Carvalho (PPGEQ/UFAL)



Prof. Dr. Acto de Lima Cunha (UFS)



Dedico esse trabalho ao meu avô, Ariston Padilha, cujo sua sabedoria levarei para o resto da minha vida, que Deus o tenha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e família cujo apoio foi de fundamental importância nesta etapa. Também agradeço aos professores José Luís e João Inácio pelo apoio e dedicação a orientação deste trabalho sempre ajudando na medida do possível e a todos que participaram diretamente e ou indiretamente deste trabalho.

RESUMO

O segmento petrolífero é um dos setores que mais movimentam capital no mundo, em contrapartida é um dos que mais geram resíduos perigosos ao meio ambiente. Em razão disso políticas mitigadoras são aplicadas a estas empresas de modo a contornar este problema. Assim a pesquisa de tecnologias de tratamento de águas residuais de processamento são importantes para o desenvolvimento e redução de custos no segmento. Dentre os processos utilizados, a flotação por ar dissolvido é uma das operações de separação física mais aplicada. A eficiência desta técnica tem forte influência na hidrodinâmica dos escoamentos internos. Na literatura pode-se observar trabalhos que propõem novas configurações para uma coluna de maneira a aumentar os tempos de residência e o contato entre as gotículas e microbolhas. Por consistir de um escoamento bastante complexo com vários fenômenos interligados, o estudo com computação fluidodinâmica torna-se fundamental a esta análise para a avaliação dos fenômenos que ocorrem dentro deste equipamento. Afim de avaliar a influência de variáveis operacionais e de projeto de uma coluna de flotação por *Airlift*, tais como: velocidades de alimentação das bolhas e efluente; posicionamento da alimentação do efluente e fluxo de remoção do efluente tratado da coluna. Estas foram avaliadas via análise computacional por meio do pacote *Ansys CFX 13*. Os principais resultados obtidos nesta análise foram: A velocidade de alimentação das bolhas possui caráter de melhoramento da eficiência da coluna a medida que esta é aumentada, de forma contrária a alimentação do efluente produz uma queda na eficiência com o aumento da velocidade desta, a alimentação em contracorrente ao topo da coluna se mostrou como configuração mais eficiente e a taxa de remoção do efluente tratado de 50% em relação a vazão volumétrica total que entra na coluna se mostrou mais eficiente que as demais taxas estudadas.

Palavras-chave: Computação Fluidodinâmica. Flotação. *Airlift*.

ABSTRACT

The oil segment is one of the sectors that move the most capital in the world, in contrast it is one of the ones that generate the most hazardous waste to the environment. Because of this, mitigating policies are applied to these companies in order to circumvent this problem. Thus the research of processing wastewater treatment technologies are important for the development and reduction of costs in the segment. Among the processes used, dissolved air flotation is one of the most applied physical separation operations. The efficiency of this technique has a strong influence on the hydrodynamics of internal flows. In the literature one can observe works that propose new configurations for a column in order to increase residence times and the contact between droplets and microbubbles. Because it consists of a very complex flow with several interconnected phenomena, the study with fluid dynamics computation becomes fundamental to this analysis for the evaluation of the phenomena that occur within this equipment. In order to evaluate the influence of operational and design variables of a flotation column by Airlift, such as bubble feed rates and effluent; positioning of the effluent feed and the effluent treatment flow from the column. These were evaluated via computational analysis via *Ansys CFX 13* package. The main results obtained in this analysis were: The bubble feed rate has the character of improving the efficiency of the column as it is increased, otherwise the effluent feed produces a fall in efficiency with the increase of the speed of this, the feed in countercurrent at the top of the column was shown to be more efficient and the rate of removal of the treated effluent of 50% in relation to the total volumetric flow entering the column was more efficient than the other rates studied.

Keywords: Computational Fluidinamic. Flotation. Airlift.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de tratamento de efluentes de uma refinaria de petróleo refazer . . .	18
Figura 2 – Separador gravimétrico (a); Hidrociclone (b); Flotador (c)	19
Figura 3 – Mecanismo de flotação	21
Figura 4 – Esquemático de uma coluna de flotação em escala laboratorial	23
Figura 5 – Coluna de flotação de He et al. (1995)	24
Figura 6 – Chicana (a); Coluna de flotação multiestágios (b)	25
Figura 7 – Reator <i>airlift</i> com tubos concêntricos	26
Figura 8 – Reator <i>airlift</i> utilizado no artigo de Nagase et al. (1998) (a) Fluxo Paralelo (b) Contra – Fluxo	27
Figura 9 – Reator experimental de Qi et al. (2013)	28
Figura 10 – Reator experimental de Ammar e Akbar (2018)	29
Figura 11 – Padrões de escoamento bifásicos em tubos verticais	31
Figura 12 – Variação de velocidade com o tempo e flutuações	35
Figura 13 – Efeito rotacional gerado pela fase contínua na fase dispersa	40
Figura 14 – Algoritmo e interconexão dos elementos dos principais softwares de fluidodinâmica computacional	42
Figura 15 – Geometria das colunas utilizadas relacionada a alimentação do efluente: (1) alimentação pela base; (2) alimentação pelo topo em contra corrente; (3) alimentação pelo topo co-corrente	45
Figura 16 – Malhas elaboradas para as colunas (1) e (2)	47
Figura 17 – Entradas e saídas das colunas	49
Figura 18 – Fração volumétrica de óleo nas colunas estudadas	54
Figura 19 – Fração volumétrica de óleo nas colunas estudadas	55
Figura 20 – Perfis de velocidade do óleo nas colunas e o direcionamento do fluxo na região de recirculação	56
Figura 21 – Perfis de fração volumétrica de óleo na coluna 2: 1 = 1 cm/s; 2 = 2 cm/s; 3 = 4 cm/s; 4 = 6 cm/s	57
Figura 22 – Eficiência na coluna 2 pela velocidade de entrada das bolhas	58
Figura 23 – Fração volumétrica de ar coluna 2: 1 = 1 cm/s; 2 = 2 cm/s; 3 = 4 cm/s; 4 = 6 cm/s	59
Figura 24 – Perfil de fração volumétrica de óleo na coluna (2): 1 = 1 cm/s; 2 = 2 cm/s; 3 = 4 cm/s; 4 = 6 cm/s	60
Figura 25 – Eficiência na coluna 2 em função da velocidade de entrada do efluente . . .	61
Figura 26 – Perfil de fração volumétrica de óleo: 1 = 40%; 2 = 50%; 3 = 60% e 4 = 70%	62
Figura 27 – Eficiência da coluna pela a remoção do efluente na base	63
Figura 28 – Resultado obtido pela simulação pelo n° de elementos da malha	64
Figura 29 – Tempo computacional pelo número de elementos na malha	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Solubilidade do ar em água a pressão de 1 atm	22
Tabela 2 – Constantes utilizadas no modelo k- ϵ	37
Tabela 3 – Geometria do do sistema analisado	46
Tabela 4 – Modelos utilizados para a resolução da simulação	48
Tabela 5 – Condições de contorno utilizadas na coluna (1)	50
Tabela 6 – Condições de contorno utilizadas na coluna (2) e (3)	50
Tabela 7 – Propriedades utilizadas para o estudo	51
Tabela 8 – Condições de contorno para o experimento numérico	51
Tabela 9 – Elementos analisados nos testes de malha	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Equipamento de Proteção Individual
ADM	Adimensional
CONOMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CFD	Computação Fluidodinâmica
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FAI	Flotação por Ar Induzido
NBR	Norma Reguladora Brasileira
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Intelectual
PPM	Partes por Milhão
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
A	Área interfacial [mm^2]
C_{ij}^D	Arraste interfacial [adm]
C_d	Coefficiente de arraste [adm]
C_l	Coefficiente de Sustentação [adm]
$\overline{C_{ij}}$	Coefficiente de transferência de momento para a interface por força de arrasto [adm]
C_f	Concentração final [ppm]
C_o	Concentração inicial [ppm]
C_1	Concentração no estado 1 [mg/L]
C_2	Concentração no estado 2 [mg/L]
λ_i	Condutividade térmica na fase i [J/msK]
C_μ	Constante do modelo $k - \epsilon$ [adm]
σ_k	Constante do modelo $k - \epsilon$ [adm]
σ_ϵ	Constante do modelo $k - \epsilon$ [adm]
c_1	Constante do modelo $k - \epsilon$ [adm]
c_2	Constante do modelo $k - \epsilon$ [adm]
δ_{ij}	Delta de Kronecker [adm]
ρ_i	Densidade da fase i [kg/m^3]
d_p	Diâmetro de bolha [μm]
d_b	Diâmetro de partícula [μm]
E_c	Eficiência de colisão [adm]
η	Eficiência de remoção [adm]
h_i	Entalpia da fase i [J/kg]
M_i	Forças de transferência de movimento [N/m^3]

α_i	Fração volumétrica da fase i [<i>adm</i>]
R	Função residual [<i>adm</i>]
Eo	Número de Eotvos [<i>adm</i>]
Mo	Número de Moodle [<i>adm</i>]
Pr	Número de Prandtl [<i>adm</i>]
Re_p	Número de Reynolds [<i>adm</i>]
$\sigma_{\alpha i}$	Número de Snhmidt [<i>adm</i>]
W_i	Ponderações para o modelo de elementos finitos [<i>adm</i>]
p_i	Pressão na direção i [<i>Pa</i>]
P_1	Pressão no estado 1 [<i>Pa</i>]
P_2	Pressão no estado 2 [<i>Pa</i>]
P_a	Probabilidade de aderência [<i>adm</i>]
P_c	Probabilidade de colisão [<i>adm</i>]
P_f	Probabilidade de flotação [<i>adm</i>]
P_p	Probabilidade de permanência [<i>adm</i>]
P_r	Probabilidade de retenção [<i>adm</i>]
σ_{tw}	Razão entre a tensão superficial da fase líquida com a água [<i>adm</i>]
T_i	Temperatura na fase i [<i>K</i>]
t	Tempo [<i>s</i>]
σ	Tensão superficial [<i>N/m</i>]
S	Termo fonte de dissipação de energia [<i>J/s</i>]
S^k	Termo fonte de energia cinética [<i>J/s</i>]
u_i	Velocidade da fase i [<i>m/s</i>]
μ_i	Viscosidade absoluta da fase i [<i>Pa·s</i>]
ν_i	Viscosidade dinâmica da fase i [<i>m²/s</i>]
ν_t	Viscosidade dinâmica turbulenta [<i>m²/s</i>]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Tratamento de efluentes líquidos na indústria do petróleo	17
3.2	Flotação	20
3.3	Configurações de colunas de flotação e principais estudos	22
3.4	Modelagem fluidodinâmica multifásica e fluidodinâmica computacional	30
3.4.1	Tipos de escoamentos em sistemas bifásicos em tubos verticais	30
3.4.2	Modelagem fluidodinâmica de escoamentos multifásicos e fluidodinâmica computacional	32
3.4.3	Modelos de fechamento de balanço: Modelo de Turbulência	34
3.4.4	Modelos de fechamento de balanço: Modelos de transferência de momento interfacial	37
3.4.5	Computação Fluidodinâmica	41
4	METODOLOGIA	45
4.1	Geometria	45
4.2	Geração da malha	46
4.3	Modelagem Matemática Proposta: Considerações de estudo, modelos utilizados e métodos de análise dos resultados	47
4.4	Estudo de caso	51
4.4.1	Influência da posição da alimentação de efluente na coluna	51
4.4.2	Influência da velocidade das bolhas	52
4.4.3	Influência da velocidade do efluente	52
4.4.4	Influência da vazão de remoção do efluente tratado ao fundo da coluna	52
4.4.5	Influência do refinamento da malha na precisão do estudo	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	Influência da entrada dos efluentes na coluna	54
5.2	Influência da velocidade de entrada das bolhas	57
5.3	Influência da velocidade de entrada do efluente	60
5.4	Influência da vazão de remoção do efluente tratado ao fundo da coluna	62

5.5	Influência da quantidade de elementos da malha	64
6	CONCLUSÃO	66
6.1	Sugestão de trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O segmento industrial de petróleo é um dos mais influentes setores no mundo e, também, um dos que mais geram impactos ambientais. Estima-se que a cada barril de petróleo extraído são gerados 3 barris de efluente líquido ou água de produção (FAKHURU'L-RAZI et al., 2009), o que se reflete para o resto da cadeia produtiva, por exemplo o refino de um barril de óleo combustível geram, aproximadamente, 16 barris em resíduos que são rejeitados ou reutilizados pela indústria (FRANCO, 2004). O descarte desses efluentes deve ser efetuado de maneira a causar o mínimo de consequências ambientais, em razão disso os governos mundiais impõem as empresas a tomada de ações mitigadoras baseada em limites pré-definidos em norma (MOTTA et al., 2013), no Brasil todo efluente líquido industrial deve atender a norma CONAMA n° 430/11 (CONAMA, 2011), que compele o limite máximo de 20 ppm em teor de óleos e graxas nestes.

O rejeito tratado possui dois destinos: descarte ou reutilização em alguns setores industriais, por motivo da alta carga de químicos o setor petrolífero é preferível a reutilização deste (ARAUJO et al., 2010). Para isso as empresas investem em sistemas de tratamento dos quais os equipamentos mais utilizados para a separação da camada líquida de óleo da fase aquosa são: flotores, leitos coalescedores, hidrociclones e separadores gravitacionais. A flotação mostra grande potencial na sua aplicação devido a sua capacidade de processamento e melhores eficiências comparando-se aos outros equipamentos (YU et al., 2017). A separação por flotação é realizada pela indução de bolhas de ar que carregam, até a superfície do equipamento, as partículas suspensas em meio líquido (BENNETT; SHAMMAS, 2010).

Com base no meio de indução das bolhas no meio líquido a flotação pode ser, usualmente, caracterizada por: flotação por ar dissolvido (FAD), flotação por ar induzido ou eletro-flotação. Sendo a FAD a configuração que melhor se destaca no meio industrial em razão da alta formação de bolhas de menor diâmetro, que influenciam positivamente o processo de separação (PRAKASH et al., 2018).

De forma a melhorar o contato entre as microbolhas e as partículas suspensas são descritos na literatura vários modelos que permitem o maior arraste dessas partículas em razão de ajustes no design do equipamento. Dentre eles, destacam-se o modelo de multiestágios de flotação de Gu e Chiang (1999) e o modelo de tubos concêntricos baseado no efeito de reciclagem que ocorre em reatores *airlift* (MARINHO, 2015).

Os modelos citados possuem como principais características o aumento do tempo de residência das microbolhas por efeito da recirculação gerada pelos elementos instalados na

coluna. Em Marinho (2015), foram avaliadas as configurações citadas sendo observado que ambas as configurações, multiestágios e *airlift*, possuem eficiências superiores as observadas quando se utilizou o processo de FAD apenas, sem nenhuma alteração de elementos internos.

Entretanto, como observado por Gu e Chiang (1999) a eficiência da separação é fortemente influenciada pela hidrodinâmica da coluna, o qual segundo Thompson (2015) a probabilidade da colisão e a possível coalescência entre as partículas e as microbolhas se deve a fatores como: Forças de cisalhamento, momento, difusão, entre outros, que podem ser controlados pelo tempo de residência dessas bolhas na coluna.

Por consequência da grande quantidade de fenômenos envolvidos na flotação uma investigação experimental pode gerar altos custos, assim o desenvolvimento da fluidodinâmica computacional traz a possibilidade de avaliação de escoamentos de forma eficiente e mais barata.

A utilização de métodos numéricos não exclui a avaliação experimental, porém orienta os projetistas na escolha de experimentos para avaliar de forma mais precisa, de modo a validar o modelo teórico do escoamento analisado computacionalmente (FORTUNA, 2012).

Apesar da melhor eficiência dessas configurações, existem poucos estudos abordando essas novas geometrias de coluna na literatura, assim como em patentes registradas no mundo, o que corrobora o caráter inovador desse presente estudo.

De forma a investigar os efeitos de variáveis operacionais e de projeto sobre a recirculação das bolhas e na eficiência de separação em uma coluna de flotação por efeito *airlift*, o presente trabalho pretende realizar uma análise numérica propondo melhorias construtivas ao equipamento.

2 Objetivos

2.1 OBJETIVO GERAL

Propiciar o melhoramento de um projeto de uma coluna de flotação com efeito *airlift*, para a separação de água e óleo, avaliando suas variáveis operacionais e de projeto, via análise numérica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar um modelo matemático, que melhor se adegue ao estudo da flotação, sem a utilização de surfactantes ou floculantes no processo.
- Verificar os efeitos do posicionamento da alimentação de efluente da coluna sobre a eficiência de remoção.
- Analisar os efeitos das velocidades de alimentação de efluente e das bolhas, assim como a vazão de remoção da corrente tratada, ao fundo, sobre a eficiência de remoção de óleo da coluna.

3 Fundamentação Teórica

O esgotamento dos recursos hídricos no mundo atingiu níveis preocupantes. Estimativas feitas pelo Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas apontam que até 2025 as pessoas atingidas por problemas com o abastecimento de água no mundo - sendo estimada para esse ano uma população de aproximadamente 8 bilhões de pessoas no mundo - subam de 10% da população mundial para 37,5%, tendo um aumento para 75% da população mundial até 2050, mantendo-se a atual taxa de degradação dos recursos hídricos atuais e de crescimento populacional, gerada em sua grande maioria por despejo indevido de efluentes industriais (BRASIL, 2010).

A indústria brasileira é responsável pelo consumo de 8,8%, o que representa mais de 8,5 milhões de m^3 de água por dia, do consumo hídrico do país, sendo também responsável pela emissão de grande parte dos efluentes (ANA, 2018). Por ser um dos ramos industriais mais importantes no país, o setor petrolífero recebe fortes pressões de políticas ambientais para mitigar suas emissões. Desta forma é importante o estudo e desenvolvimento de técnicas de tratamento desses efluentes, assim como a otimização dos equipamentos já instalados.

Esta fundamentação visa desenvolver uma visão dos principais métodos de tratamento de efluentes na indústria do petróleo, os equipamentos utilizados nas etapas, a utilização da flotação e principais trabalhos na área e uma fundamentação sobre escoamento multifásico, assim como uma breve introdução a modelagem computacional.

3.1 TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

A água é matéria-prima para diversos processos fabris, sendo os setores de alimentos; bebidas; papel e celulose; metalurgia; produtos químicos e biocombustíveis, são responsáveis pelo consumo de 90% de todo consumo de água no segmento de transformação (ANA, 2017), ao final da sua utilização a água que sobra se torna um rejeito ou efluente, devendo ser devidamente tratada para que se atenda as legislações vigentes (THOMPSON, 2015).

Efluentes líquidos industriais são definidos pela Norma Regulamentadora Brasileira (NBR) 9800-1987 como referente a todo rejeito líquido proveniente de processamento industrial, a água residual, como principal efluente industrial, carrega consigo grande parte dos rejeitos da indústria, o que ocasiona diversos danos ambientais (ARAUJO et al., 2010).

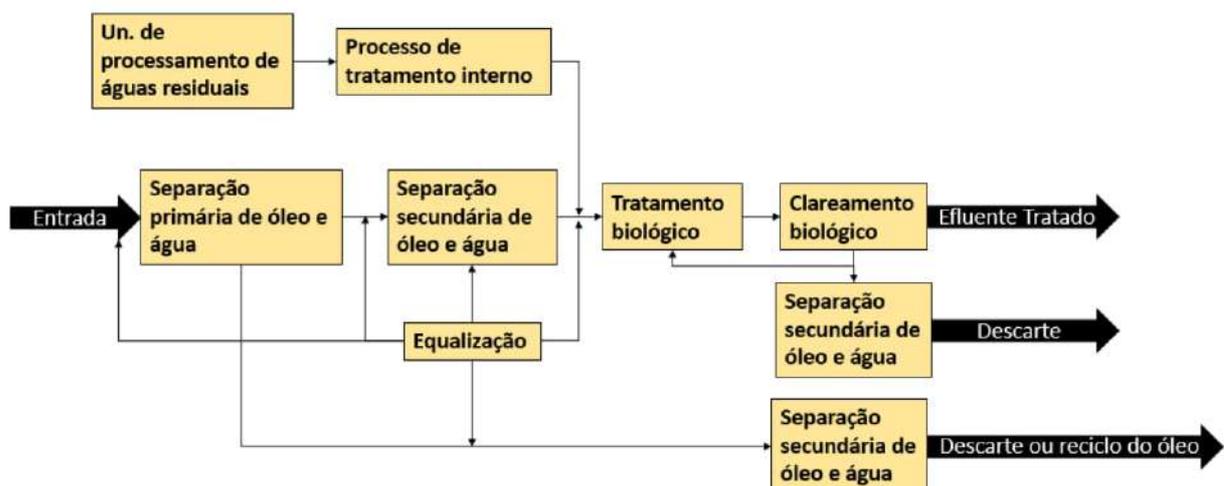
Por causa da sua natureza, os efluentes da indústria petrolífera são remetidos a reuso industrial, após o seu tratamento. Na literatura pode ser encontrada algumas dessas aplicações

para este (MOTTA et al., 2013), reinjeção em poços (WANG et al., 2011), fraturamento hidráulico (FRANCO, 2004). O tratamento desses efluentes segundo BRAILE e CAVALVANTI (1993), pode ser dividido em quatro etapas:

- **Pré-Tratamento:** Remoção de sólidos de maiores granulometrias, ajuste do pH das soluções e temperatura;
- **Tratamento Primário:** Remoção dos agentes poluentes (Orgânicos e Inorgânicos) por equipamentos mecânicos, por exemplo a flotação, a adição de agentes flocculantes e/ou surfactantes, pode ser feita para facilitar a remoção
- **Tratamento Secundário:** Remoção da carga orgânica remanescente por processos de biodegradação.
- **Tratamento Terciário:** Remoção da carga inorgânica e orgânica dissolvida, que não foi removida em processos anteriores, são utilizados processos mais caros como ultra filtração por membranas ou também processos biológicos complementares.

Segundo Jafarinejad (2016), plantas industriais de refino não utilizam métodos mais avançados de tratamento, como os encontrados no tratamento terciário, pois os custos para a manutenção e operação são bastante elevados, apenas utilizando as primeiras etapas de processos, citadas anteriormente. A Figura 1, exemplifica uma planta de tratamento de águas residuais de refinarias de petróleo.

Figura 1 – Sistema de tratamento de efluentes de uma refinaria de petróleo refazer

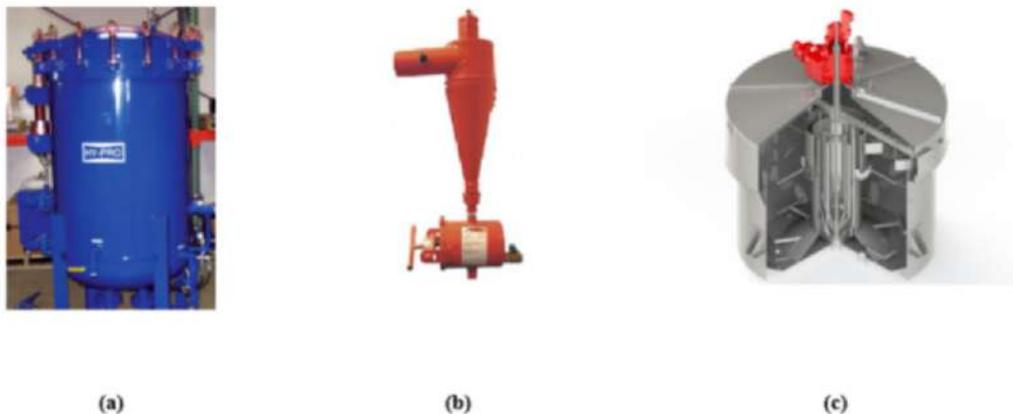


Fonte: Adaptado de Jafarinejad (2016)

Após o pré-tratamento, os efluentes seguem para uma etapa de separação por meio de equipamentos projetados para a recuperação do óleo por meio de diferença entre variáveis dos componentes, por exemplo: variação entre as densidades. Os equipamentos mais comuns utilizados nessa etapa são: Separadores gravimétricos (Figura 2 (a)), hidrociclones (Figura 2 (b)) e flotadores (Figura 2 (c)) (FIDELIX, 2017).

Na Figura 1 esta etapa pode ser observada no quadro "Separação primária de óleo e água", a etapa de equalização está presente nas etapas primária e secundária de maneira a garantir que não ocorram uma flutuação grande nas corrente, assim garantindo a maior eficiência dos equipamentos permitindo que eles operem em suas faixas de projeto (JAFARINEJAD, 2016).

Figura 2 – Separador gravimétrico (a); Hidrociclone (b); Flotador (c)



Fonte: Irrisyst (2017);E2Flot (2017);Industry (2017)

Os separadores gravitacionais, Figura 2 (a), possuem como força motriz a diferença de densidade entre as fases. Dependendo da força da gravidade para a ocorrência da decantação entre os componentes mais pesados e, assim, necessitando de grandes áreas superficiais para a remoção de óleo. Possuindo a desvantagem de não conseguir separar as camadas emulsionadas com tamanhos de gotículas menores.

Os hidrociclones, Figura 2 (b), possuem vantagem em comparação aos separadores gravitacionais pela ação da força centrífuga que atua sobre as fases mais pesadas. A indução dessa força a separação das fases no equipamento de forma mais rápida. Porém por uma desvantagem a este é em relação as obstruções que podem ocorrer durante a fase de operação destes (MOTTA et al., 2013).

Assim, a flotação apresenta melhor desempenho de separação, não necessitando de grandes áreas de equipamento, possuindo uma ótima relação entre o custo e taxa de separação

(PRAKASH et al., 2018).

Na literatura é muito comum se observar a utilização de produtos químicos para melhorar a eficiência de separação em equipamentos de flotação em geral.

Porém como observado por Marinho (2015), para o tratamento de água de produção de petróleo, não foi necessário a adição destes, produzindo boas taxas de separação apenas modificando variáveis operacionais na coluna. Desta forma, tornando o processo mais atrativo economicamente.

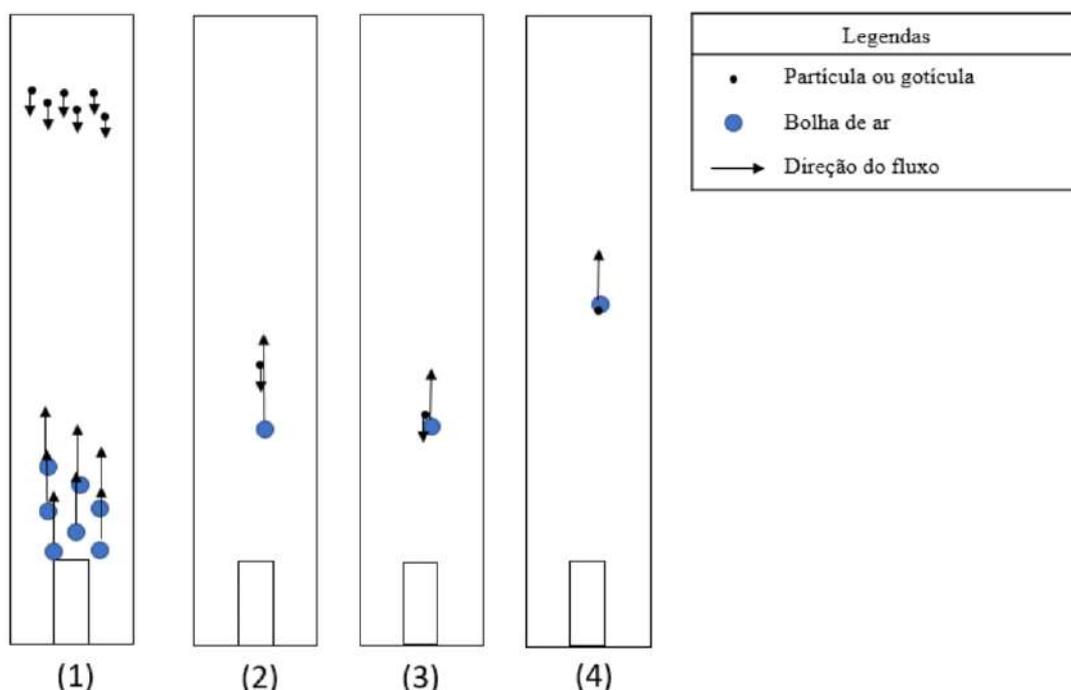
3.2 FLOTAÇÃO

A flotação é uma técnica de separação amplamente aplicada a tratamentos de águas residuais, de esgoto e separação de minérios, em razão dos baixos custos e boa eficiência, tendo um grande potencial ao se tratar de efluentes líquidos de petróleo. A eficiência deste método pode reduzir mais de 90% do material oleoso (YU et al., 2017).

Para que a flotação ocorra de forma eficiente, deve-se atentar as formas de interação entre partícula/gotículas-bolha cuja flotação de partículas ou gotículas um fenômeno que ocorre através de várias etapas.

Segundo Shi (2006), o princípio dessa operação se baseia nas etapas de: (1) geração das bolhas de ar, induzidas por um disco rotativo ou por saturação do meio por ar; (2) contato entre as bolhas formadas com o efluente; (3) aderência das bolhas com o efluente e (4) carregamento deste efluente capturado até a superfície, podendo ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Mecanismo de flotação



Fonte: Autor (2019)

Por parte da geração de bolhas, o processo pode ser conduzido por ar induzido (FAI), por ar dissolvido (FAD) ou por eletroflotação, o qual varia de acordo com a forma de indução das bolhas no meio.

A eletro-flotação é um processo que gera microbolhas de gás através da reação de eletrólise com o meio produzido por um eletrodo carregado eletronicamente é aplicada em sistemas de remoção com suspensões leves, possuindo bons resultados para suas aplicações propostas, porém ainda baixos rendimentos em comparação aos demais métodos e de aplicação restrita a alguns sistemas (RUBIO et al., 2002).

Em processos FAD, o ar é saturado a uma pressão maior que a atmosférica, posteriormente depressurizado no meio, dessa forma as bolhas formadas possuem tamanhos de até $100 \mu m$, em comparação ao FAI que tem um processo induzido por um disco a altas rotações que geram grandes bolhas de até $1000 \mu m$ (BENNETT; SHAMMAS, 2010), em equipamentos bem dimensionados.

Assim é sugerido na literatura para sistema que necessita de melhores eficiências de tratamento, utiliza-se a FAD, em virtude do tamanho das bolhas formadas em comparação a FAI, que aumenta o contato entre o efluente e as microbolhas, por conseguinte aumentando a eficiência do processo (PRAKASH et al., 2018).

Na FAD, o volume da bolha de ar está relacionado a lei de Henry que associa a pressão com a concentração de gás dissolvido no meio, sendo essas diretamente proporcionais e inversamente proporcionais a pressão e a temperatura no saturador, respectivamente (SHAMMAS et al., 2010). A Tabela 1, relaciona a solubilidade do ar em água a pressão de 1atm e temperatura no saturador.

Tabela 1 – Solubilidade do ar em água a pressão de 1 atm

Temperatura [C]	Solubilidade [% v/v]
4	2,63
20	1,87
50	1,30

Fonte: Shammass et al. (2010)

A maior solubilidade do ar dentro do saturador induz um maior deslocamento deste quando houver a despressurização do equipamento na coluna, que melhora a separação do efluente, essa variável é denominada *gas hold up*, que é função do diâmetro das bolhas e vazão do gás (RAN et al., 2013).

Existem alguns autores na literatura que relacionam a pressão dentro do saturador com a distribuição dos diâmetros de bolha na coluna, em Rijk et al. (1994) foi observada uma distribuição média de bolhas entre 20 – 50 μm a pressões acima de 3,09 kgf/cm^2 , já em Shannon e Buisson (1980) observou a modificação dos diâmetros médios de bolhas em sistemas a elevadas temperaturas, obtendo um diâmetro médio de 66 μm a uma pressão de 2,14 kgf/cm^2 e 42 μm a uma pressão de 2,81 kgf/cm^2 .

Entretanto trabalhar com elevadas pressões no saturado provoca elevados custos ao processo, podendo-o torna inviável, contudo alguns autores indicam que as melhores condições de trabalho na separação óleo-água ocorrem a pressões próximas a 3 kgf/cm^2 . Segundo Shammass et al. (2010) altas pressões influenciam na menor dissipação de energia reduzindo as chances das bolhas atingirem o tamanho de equilíbrio eclodindo-as, diminuindo a eficiência do processo.

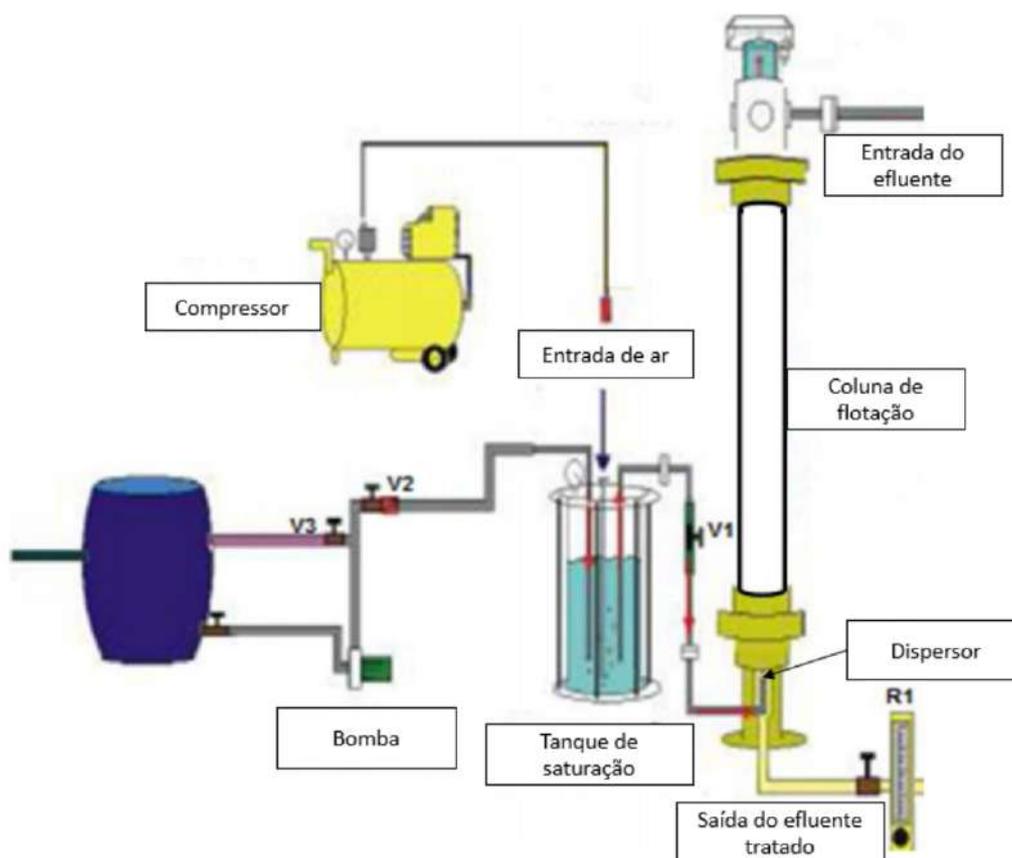
Dessa forma, para melhorar o contato entre as partículas ou gotículas com as microbolhas ou bolhas acaba gerando estudos da hidrodinâmica dentro da coluna de flotação, assim alguns autores elaboraram equipamentos que permitissem um melhor contato entre essas fases.

3.3 CONFIGURAÇÕES DE COLUNAS DE FLOTAÇÃO E PRINCIPAIS ESTUDOS

Uma coluna de flotação por ar dissolvido é constituída basicamente de três equipamentos, conforme a Figura 4: Tanque de saturação, bocal e a coluna de flotação. O bocal permite

a despressurização do líquido na coluna formando as bolhas de ar no meio, este pode ser configurado a permitir a melhor formação de bolhas, com a adição de dispersores ou não (RIBEIRO, 2012).

Figura 4 – Esquemático de uma coluna de flotação em escala laboratorial

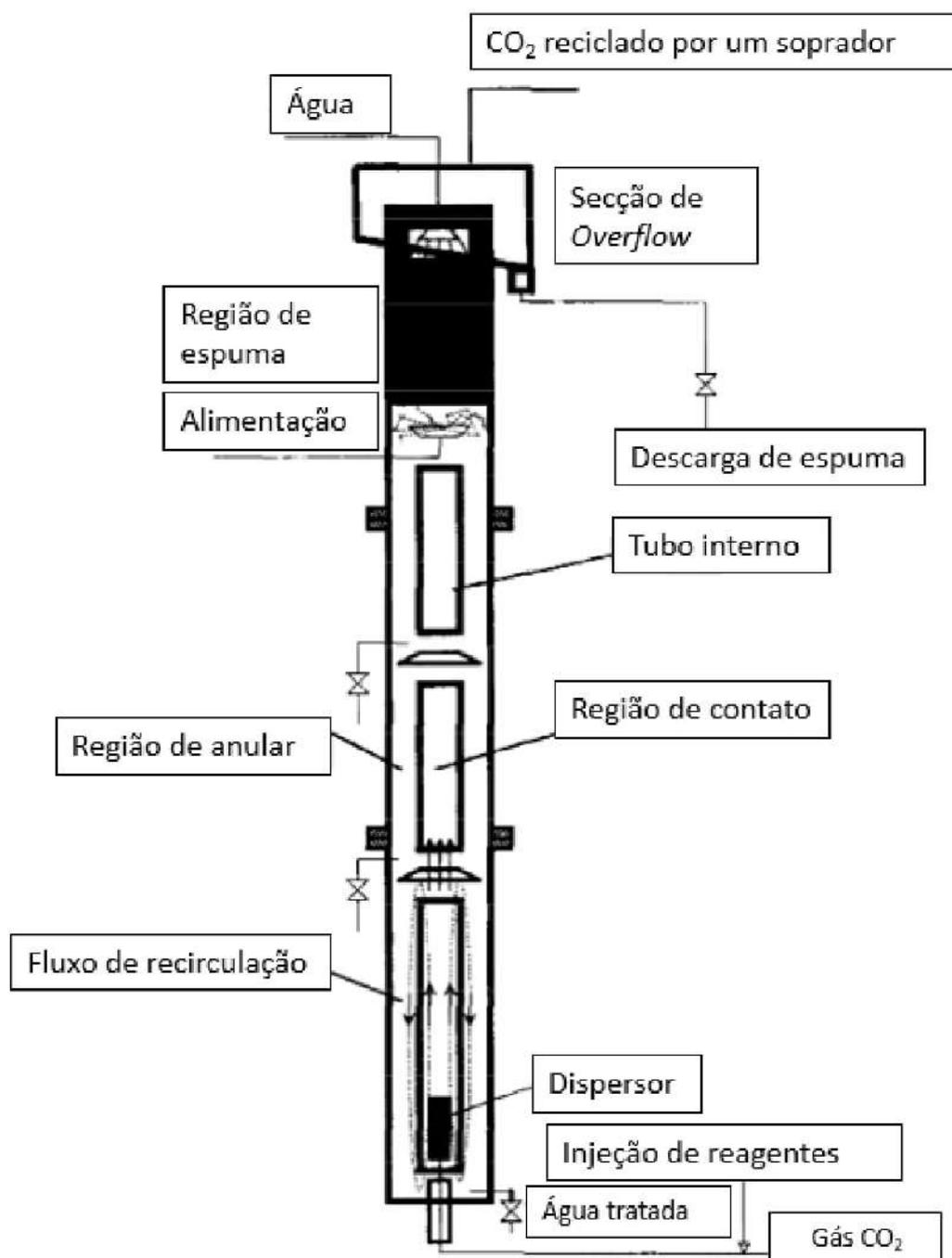


Fonte: Adaptado de Fonseca (2010)

A Figura 4 pode ser observado a montagem de um equipamento de flotação por ar dissolvido em escala laboratorial, onde é utilizado um compressor para induzir o ar no tanque de saturação, que pode conter água ou efluente, dependendo das limitações e das configurações das instalações. O dispersor, ao fundo da coluna, é utilizado para manter o fluxo das bolhas homogêneo e com pouca variação nos diâmetros das bolhas.

Em He et al. (1995) estudou um sistema de flotação multi-estágio - onde haviam regiões no tubo interno que forçava o fluxo externo a recircular dentro destes, a estas regiões é dado o nome de estágio de recirculação - o qual foi observada pelos autores uma melhor colisão entre as fases dispersas, óleo e ar. Sendo sua geometria facilmente adaptada aos processos de flotação comum, bastando acrescentar um tubo concêntrico e chicanas, Figura 5.

Figura 5 – Coluna de flotação de He et al. (1995)

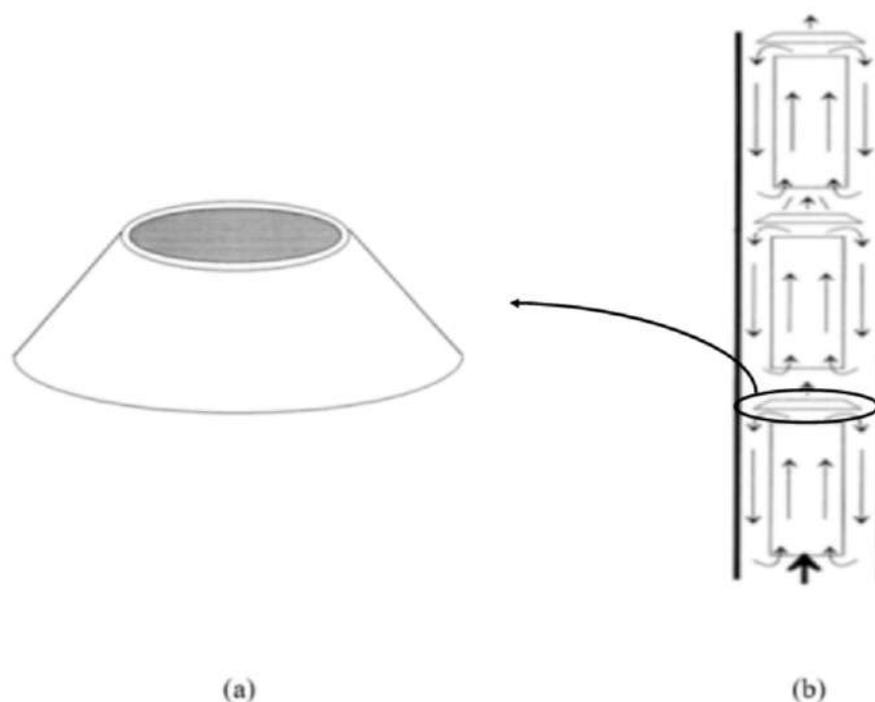


Fonte: Adaptado de He et al. (1995)

Foi observado pelo autor as influências de diferentes estágios de recirculação, onde foi observado uma melhor remoção a partir do acréscimo de mais estágios de recirculação na coluna. Outro ponto avaliado pelos autores foi a melhora da remoção de óleo utilizando CO_2 como gás de arraste, pois pela diminuição do pH gerada pela utilização deste fluido no meio reduzindo a repulsão entre as gotas de óleo e as bolhas de gás, com isso foi observado por eles remoções acima de 90% utilizando CO_2 .

Gu e Chiang (1999), assim como He et al. (1995), desenvolveram uma coluna de configuração semelhante, utilizando como gás o ar comum, conforme a Figura 6 (a), a adição das chicanas permitia uma zona de baixa pressão nas regiões entre estágios, possibilitando um maior tempo de residência das bolhas na coluna conforme Figura 6 (b), utilizando ar como gás de arraste e mais estágios de recirculação foi encontrado uma separação de emulsões leves de 90 – 93% de remoção.

Figura 6 – Chicana (a); Coluna de flotação multiestágios (b)



Fonte: Extraído de Gu e Chiang (1999)

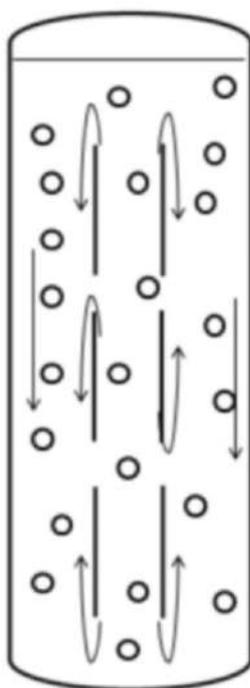
Gu e Chiang (1999) descrevem que existem fortes indícios da influência da eficiência obtida com a hidrodinâmica da coluna, com base em uma equação cinética de remoção de óleo cujo sua constante era influenciada por variáveis como: pressão, diâmetro das bolhas entre outras, assim a modificação de elementos na coluna pode influenciar positivamente ou negativamente a eficiência da separação.

Outro modelo utilizado para o tratamento de efluentes são os reatores *airlift*, Figura 7, que é um caso especial de coluna de borbulhamento. A diferença de ar entre as regiões do reator permite a recirculação do líquido dentro da coluna, aumentando o seu tempo de residência das bolhas de ar (AMMAR; AKBAR, 2018).

Apesar dessa configuração ser uma configuração que possui vantagens, como distribuição

mais uniforme das bolhas na coluna (MARINHO, 2015), trabalhos citados na literatura relacionados diretamente a este equipamento são escassos, porém associações entre equipamentos semelhantes podem ser realizadas.

Figura 7 – Reator *airlift* com tubos concêntricos

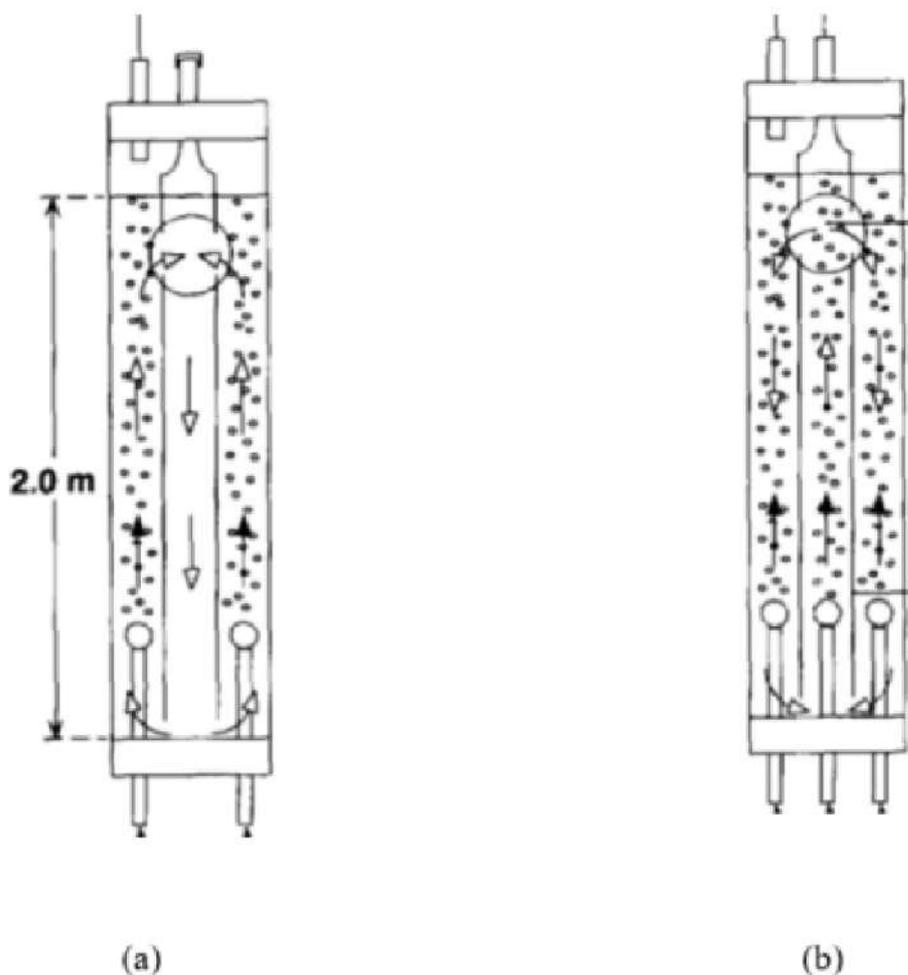


Fonte: Extraído de Marinho (2015)

Nagase et al. (1998) utilizou um reator *airlift* para a remoção de óxido nítrico por meio do contato com alga verde, *Dunaliella tertiocta*, sendo observada uma elevada taxa de remoção do poluente com a aeração de pequenas bolhas, que propicia um melhor contato entre as bolhas e as algas.

Também foram testadas duas configurações para este reator, as quais o autor teve como objetivo observar quais propiciava um melhor contato entre as bolhas e as algas, foram analisadas as conformações com fluxo paralelo e contra fluxo, Figura 8.

Figura 8 – Reator *airlift* utilizado no artigo de Nagase et al. (1998) (a) Fluxo Paralelo (b) Contra – Fluxo

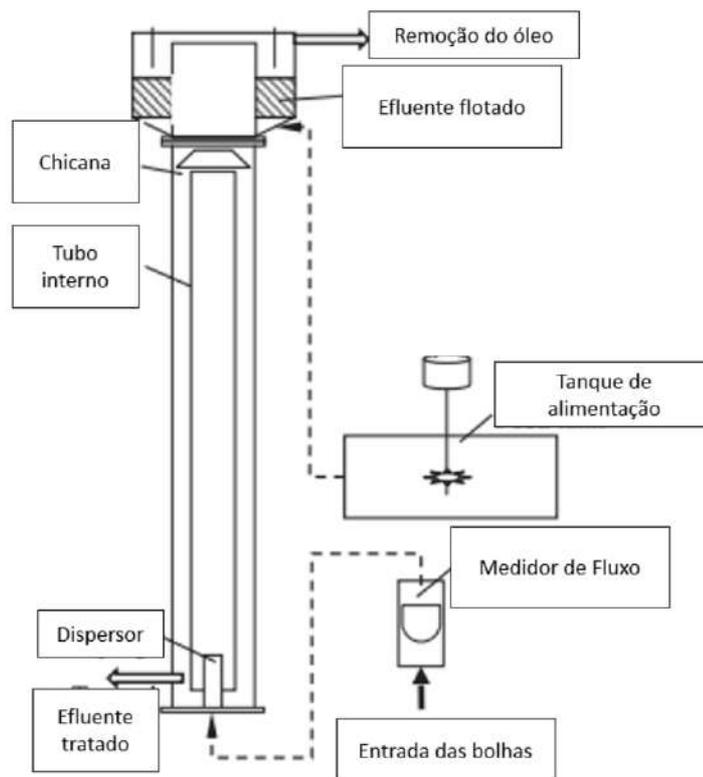


Fonte: Extraído de Nagase et al. (1998)

No reator de fluxo paralelo, Figura 8 (a), o contato entre as bolhas e as algas ocorre em um movimento cíclico no reator não muito efetivo segundo os autores, ao contrário do que ocorre em (b), que devido ao contato entre as correntes ascendentes e descendentes a permuta de massa entre as fases, assim como, o aumento da fração volumétrica de ar ou *gas holdup*, o que permite um melhor tratamento do efluente.

Em Qi et al. (2013) foi utilizado uma coluna de flotação *airlift* para a remoção de óleo em águas de produção de petróleo, a configuração analisada pelos autores se assemelha ao modelo estudado por Gu e Chiang (1999) e o reator de Nagase et al. (1998) conforme Figura 9.

Figura 9 – Reator experimental de Qi et al. (2013)



Fonte: Adaptado de Qi et al. (2013)

Na Figura 9 é observado o fluxo paralelo na coluna onde o fluxo ascendente no *riser*, região interna do tubo interno da coluna, onde este é redirecionado por meio de uma chicana ao topo do tubo, segundo os autores esse formato de recirculação interna aumenta a eficiência do equipamento, assim como reduz os custos do processo.

Para o equipamento estudado a separação ótima ocorre em um fluxo gasoso entre 10 - 15 $m^3/(hm^3)$ decaindo em fluxos maiores em razão da alta concentração de ar e turbulência nessa fase dificultando o contato entre as fases.

O autor discute a utilização de polímeros, como a poliacrilamida hidrolisada (HPAM), álcalis (NaOH) e sulfatantes (Sulfonato de alquilbenzeno), obtendo resultados deste 30,2% de remoção de óleo com altas concentrações de sulfatantes até 97,3 % utilizando 45 mg/L de polímero. Foi verificado uma eficiência de 89,3 % de remoção de óleo sem a utilização de químicos para uma concentração inicial de 449,1 ppm de óleo no efluente.

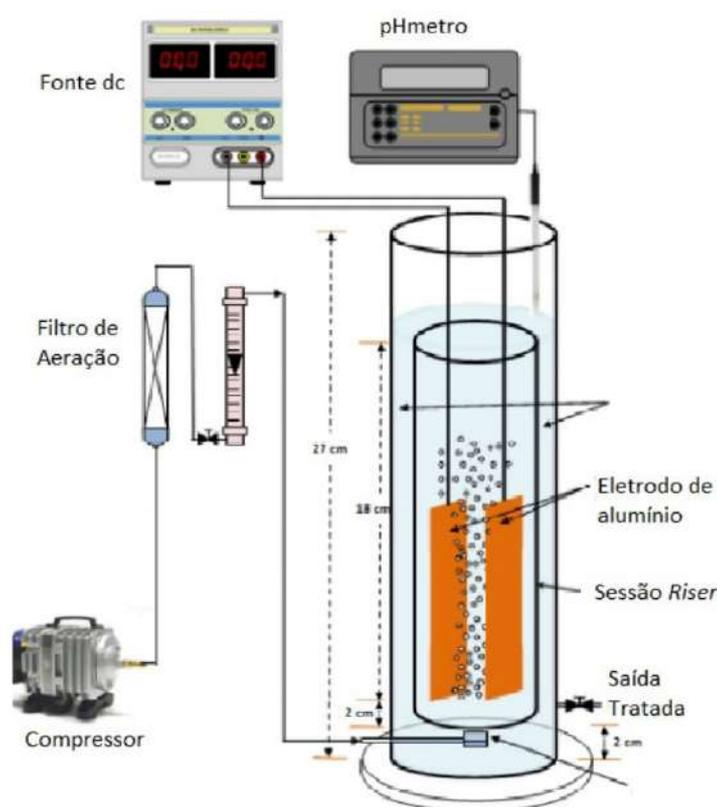
Em Marinho (2015), foram comparados os perfis de coluna de flotação do tipo *airlift*, com multiestágios e pelo método comum, sendo observado distribuição de bolhas uniforme na coluna com a configuração *airlift*. Em consequência pode-se inferir uma melhor separação de

efluentes para este perfil de coluna. Outro fator preponderante nesse trabalho foi a não utilização de produtos químicos, o que permitiu um menor custo da operação.

Outro ponto avaliado pela autora foi a influência positiva na remoção de óleo, por meio das ações combinadas entre as variáveis de vazões de diluição e efluente junto a concentração do efluente no meio, isso foi sinalizado pela mesma devido ao favorecimento do contato entre as gotículas de óleo com as bolhas de ar, obtendo eficiência maior que 80%.

Em Ammar e Akbar (2018), foi utilizado um eletroflotador de acrílico com dois tubos concêntricos semelhante ao flotor utilizado por Qi et al. (2013), sem a chicana ao topo do reator, pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Reator experimental de Ammar e Akbar (2018)



Fonte: Adaptado de Ammar e Akbar (2018)

A utilização dos eletrodos de alumínio, geram bolhas de hidrogênio, que se desprendem desses. Segundo o autor, se mostrou eficiente, assim como foi verificado uma redução no consumo energético do eletroflotador ao se comparar com os modelos convencionais.

Para a otimização da eficiência da coluna deve-se observar a hidrodinâmica da mesma, como foi analisado por Gu e Chiang (1999), esse é um fator preponderante para a elaboração da configuração deste equipamento. Assim, o advento de técnicas computacionais modernas junto

ao estudo da fluidodinâmica, trazem uma nova forma de avaliação para análises de escoamentos mais complexas como ocorre neste tipo de operação.

3.4 MODELAGEM FLUIDODINÂMICA MULTIFÁSICA E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Há uma forte influência do estudo da hidrodinâmica em uma coluna de flotação, pois a otimização das variáveis produz um melhor contato entre efluentes e as bolhas que flutam ao topo da coluna.

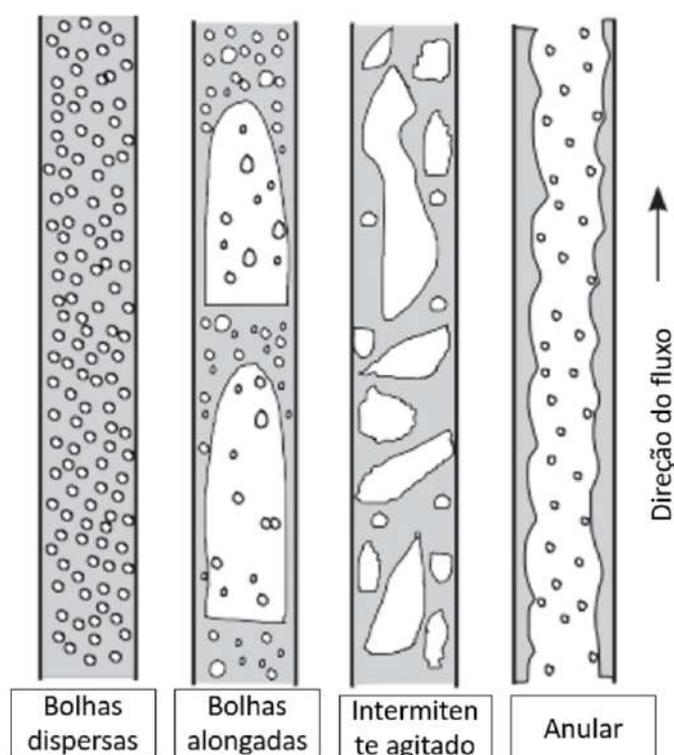
Porém, esta avaliação se torna complexa em razão do grande número de fenômenos que ocorrem na coluna, sendo fundamental a análise destes por meio de *softwares* de computação fluidodinâmica, a vista disso essa seção trata de aspectos introdutórios a fluidodinâmica, tal como da fluidodinâmica computacional.

3.4.1 Tipos de escoamentos em sistemas bifásicos em tubos verticais

Escoamentos bifásicos são definidos pela mistura de fases que podem ser gases dispersos em líquidos (bolhas) ou líquidos dispersos em gases (gotículas) entre outros exemplos. Em geral a fase mais densa tende escoar em menor velocidade que a menos densa, assim como influenciar positivamente na perda de pressão no escoamento e nos perfis de escoamento (COATES; PRESSBURG, 1959).

A análise física dos escoamentos bifásicos não pode ser definida de igual forma ao escoamento monofásico, como: lamina; transição e turbulento, pois a influência da outra fase ou mesmo a posição do tubo onde ocorre o escoamento acarreta em características distintas aos padrões de fluxo, como ilustra a Figura 11 (CROWE CLAYTON T.; MICHAELIDES, 2016).

Figura 11 – Padrões de escoamento bifásicos em tubos verticais



Fonte: Extraído de Crowe Clayton T.; Michaelides (2016)

Conforme a Figura 11 temos as definições dos padrões de escoamentos bifásicos, mas comuns, como:

- **Escoamento de Bolhas (Bubbly flow):** Há o escoamento do gás em pequenas bolhas que variam seu formato de acordo com o seu tamanho, bolhas menores tendem a obedecer um formato esférico, já as maiores tendem a possuir formatos variados de elipsoides a outros formatos. Outro ponto observado as bolhas podem ascender em diferentes posições radiais.
- **Escoamento Intermitente de Bolhas Alongadas (Slug flow):** É caracterizado pelo pela formação de bolhas grandes e espaçadas entre si, tende a ter uma posição simétrica em relação a tubos horizontais.
- **Escoamento Intermitente Agitado (Froth flow):** É gerado através do aumento da velocidade do gás no meio líquido, o qual começa a não sustentar mais o formato de bolhas, ocorrendo grande instabilidade na formação destas.
- **Escoamento Anular (Annular flow):** É caracterizado pelas altas velocidades gasosas e baixa velocidade do líquido, assim a camada líquida escoava pelas paredes do tubo havendo

pequenas ondulações na região de interface.

Em sistemas de bolhas induzidas em um líquido, estas podem coalescer e transformar o sistema em um sistema de bolhas alongadas, sendo essa transição dependente do tamanho das bolhas, das dimensões da coluna, dos efeitos da tensão superficial e das condições de entrada no sistema. Para propósitos práticos as determinações pode-se tomar como um ponto de transição do escoamento como aquele que apresenta um *holdup* de gás de 0,1 (WILKES; BIRMINGHAM, 2006).

Apesar dessa imprecisão, a identificação do regime de escoamento em fluxos multifásicos é de fundamental importância, pois permite ao analista avaliar aspectos geométricos das fases analisadas que influenciam na modelagem do escoamento, assim como o acoplamento entre as fases estudadas (ROSA, 2009).

Este acoplamento entre fases presentes pode gerar uma alta complexidade ao modelo, pois suas alterações geram modificações nas equações de balanço. Esse acoplamento varia de acordo com a concentração das partículas no meio, que podem ser descritos como acoplamentos (ROSA, 2009):

- **Uma via:** A partícula possui pouca ou nenhuma influência nas equações de balanço no fluido contínuo, o que quase pode ser descrito como um fluxo monofásico. Esse tipo de acoplamento ocorre em baixas concentrações, em alguns trabalhos pode-se considerar com concentrações de partículas, abaixo de 10% da fração volumétrica. Exemplo: Dispersão de mercaptano em correntes de gás natural.
- **Dois vias:** Há uma concentração de partículas intermediária que promove uma influência bilateral entre as partículas e o fluido disperso, porém devido o espaçamento entre o fluido disperso, não há influência entre essas partículas. Exemplo: Colunas de borbulhamento com alto fluxo de ar.
- **Quatro vias:** A concentração de particulado é tão alta que a influência nas equações de balanço se tornam mutuas entre todas as fases, partícula - partícula, partícula - fase contínua. Exemplo; Leitões fluidizados.

3.4.2 Modelagem fluidodinâmica de escoamentos multifásicos e fluidodinâmica computacional

Dado um escoamento em uma região ao qual se aplica duas ou mais fases é considerado multifásico, podendo corresponder a uma grande gama de problemas na engenharia em maneira

geral. Sendo a complexidade do modelo aumentando de acordo com o número de fases e/ou componentes nesse sistema, porém as equações de transporte, massa, momento e energia (ROSA, 2009), cujos seus princípios se baseiam nas leis de conservação de massa, segunda lei de Newton e primeira lei da termodinâmica. Em um sistema multifásico as equações de conservação de massa, momento e energia assumem as equações 1 a 3 ,respectivamente.

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i (\rho_i \vec{u}_i \vec{u}_i)) = -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot (\alpha_i \mu_i (\nabla \vec{u}_i + (\nabla \vec{u}_i)^T)) + M_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i h_{toti})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{u}_i) = -\nabla \cdot (\alpha_i (\lambda_i \nabla T_i - \frac{\rho_i \nu_{ti}}{Pr} \nabla h_i)) + p (\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \vec{v}_i)) + H_{i,int} \quad (3)$$

Os termos sobrescritos i, representam as fases encontradas em cada sistema, α , \vec{U} , p , μ , representam as frações volumétricas, campo de velocidades, pressão e viscosidade das fases.

O termo M_i representa as forças de transferência de movimento: Força de arrasto (*Drag Force*), Força de sustentação (*Lift Force*), Força de dispersão turbulenta (*Turbulent Dispersion Force*) entre outras, estas forças são normalmente associadas um somatório o qual dependendo do sistema podem ser desprezadas ou não (PADRÓN, 2012).

λ , h , T , Pr , são respectivamente: condutividade térmica, viscosidade turbulenta, numero de Prandtl e a entalpia total do sistema ou a entalpia média perto das interfaces ($H_{i,int}$). O termo $-\nabla \cdot (\alpha_i (\lambda_i \nabla T_i - \frac{\rho_i \nu_{ti}}{Pr} \nabla h_i))$, está associado ao fluxo de calor interfacial (PADRÓN, 2012).

Devido a complexidade das equações de transporte, acima citadas, possuem solução para um grupo pequeno de situações os quais não são suficientes para a maioria das análises fluidodinâmicas. A dinâmica dos fluidos utiliza de métodos matemáticos que discretizam estas equações diferenciais parciais em sistemas algébricos mas fáceis de serem resolvidos (POTTER; WIGGERT, 2003).

A resolução desses sistemas se baseia no método dos volumes finitos, sendo mais comum nas abordagens numéricas em *softwares* comerciais, tais como a abordagem Euleriana-Euleriana, que desenvolve em um domínio fluido, um conjunto de elementos cujas soluções dos sistemas de equações diferenciais parciais é resolvido discretamente tanto para o domínio do tempo quanto para o espaço.

Dessa maneira é possível obter a distribuição pontual das variáveis de interesse no estudo fluido dinâmico (ANSYS, 2013).

A abordagem Euleriana-Euleriana, consiste na hipótese que as fases envolvidas no escoamento como sendo contínuas, esse tratamento se relaciona ao comportamento da fase em si como um campo de propriedades em função da posição e do tempo, se diferenciando do modelo Lagrangeano cujo tratamento se relaciona ao comportamento das partículas em função do tempo ao longo da sua trajetória.

Segundo Kostoglou et al. (2007), vários pesquisadores vem acompanhando a evolução dos códigos de computação fluidodinâmica (CFD), para sua aplicação em processos de flotação. Em sua abordagem ao problema os autores avaliaram as taxas de flotação em um processo FAD ocorrido em um tanque de tratamento de água e esgoto.

De acordo com o trabalho foi verificado pelos autores que a flutuabilidade das bolhas, estabilização das partículas e a turbulência são variáveis que influem cooperativamente a flotação. Sugerido pelos autores após o estudo que sistemas com menores diâmetros de bolha junto a uma alta taxa de fluxo gasoso com uma chicana vertical propicia um melhor eficiência de separação de partículas em águas de esgotamento.

Em Salem-Said et al. (2013), foi utilizado computação fluidodinâmica para a análise de rotores de indução de bolhas em processos FAI cujos efeitos do tamanho das bolhas e fração volumétrica de ar avaliados ao campo de velocidade no equipamento foram avaliados. Segundo os autores menores bolhas geram maiores tempos de residência percorrendo maiores distâncias no equipamento, aumentando os níveis de fração de ar no equipamento.

Em Wang et al. (2018), foi estudado a flotação contra-co-corrente por ar dissolvido, utilizando computação fluidodinâmica. Essa formatação do equipamento permite a estabilização das micro-bolhas de ar e devido ao aumento da turbulência existe a possibilidade de formação de redemoinhos que permite maior retenção dessas bolhas, o que permitiu uma melhor separação.

Em Rodrigues e Béttega (2018), foi avaliado um tanque de flotação sobre o processo FAD, onde foi observado pelos autores que o modelo de turbulência $k - \epsilon$ era o mais indicado para representar o escoamento dentro de tanques de flotação por ar dissolvido.

3.4.3 Modelos de fechamento de balanço: Modelo de Turbulência

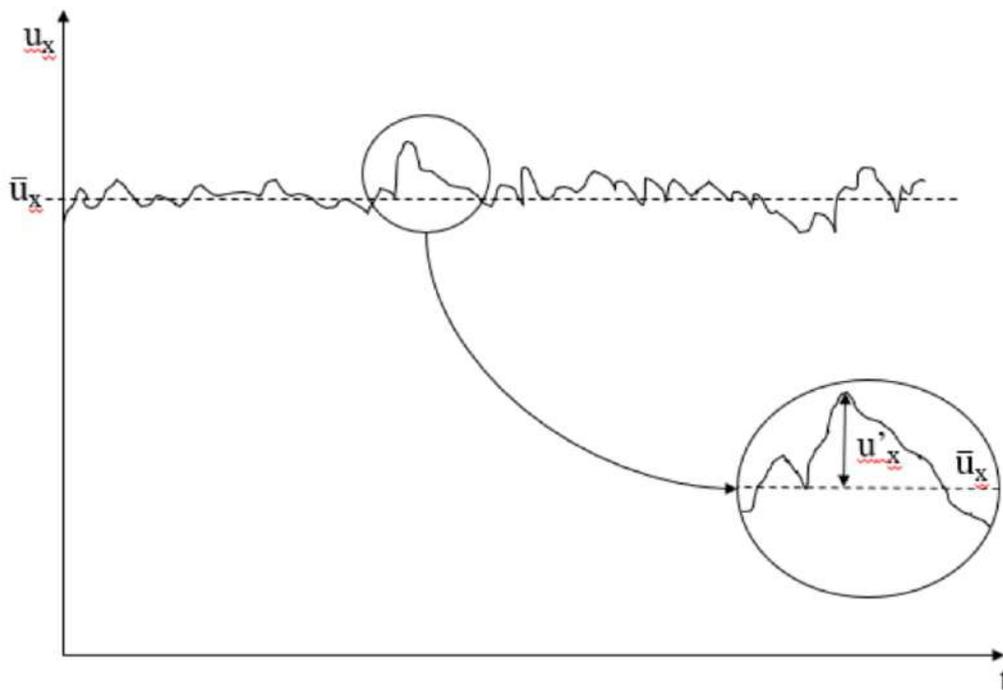
Diferentemente do padrão de escoamento laminar que possui perfis de variáveis bem ordenados, fluxos turbulentos tendem a um movimento caótico, porém bastante presente nos problemas de engenharia (BIRD et al., 2002).

O padrão turbulento tende as características de mistura e transferência de propriedades e altas taxas de dissipação de energia. Assim devido as complexidades avaliadas no fenômeno de

turbulência o estudo e compreensão deste se torna um campo bastante pesquisado na fluidodinâmica (SOUZA et al., 2011).

Um dos principais modelos de avaliação de turbulência são os modelos baseados na decomposição de Reynolds ou conhecido por RANS (*Reynolds Averaged Navier- Stokes*), o qual parte da suposição que todas as variáveis de momento, podem ser decompostas em componentes médias temporais e sobre termos de flutuação, conforme ilustra a Figura 12, abaixo (WILKES; BIRMINGHAM, 2006):

Figura 12 – Variação de velocidade com o tempo e flutuações



Fonte: Autor (2019)

Conforme a Figura 12, a decomposição da variável pode ser feita através da soma entre a média temporal e flutuação dessa variável, Equação 4, assim podendo, por analogia, resolver o problema de turbulência com a equação de Navier-Stokes, equação 5, para um escoamento monofásico (REZENDE, 2009).

$$u_x = \bar{u}_x + u'_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + g_i \quad (5)$$

Onde os termos com barras são termos médios de pressão e velocidade, ν é a viscosidade dinâmica e o termo $\overline{u'_i u'_j}$ está relacionado as tensões de Reynolds de flutuação.

De maneira geral um dos modelos mais comuns de obter o termo de flutuação é por meio da hipótese de Boussinesq, que se baseia se baseia na Lei de viscosidade de Newton para obter esse termo, conforme a equação (6) (JÚNIOR, 2011).

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_i} \delta_{ij} \quad (6)$$

Onde o termo ν_t é o termo de viscosidade turbulenta e δ_{ij} é o delta de Kronecker. A viscosidade turbulenta é um termo bastante estudado em modelos RANS, sendo um dos mais utilizados na engenharia para descrever esta variável é o modelo $k - \epsilon$ que se relaciona com a energia cinética turbulenta e a dissipação turbulenta, representado pelas equações (7) a (9) abaixo (DAVIDSON, 2004)

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i k_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_i}{\partial x_j} \right) - \epsilon + S^k \quad (8)$$

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \epsilon_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial x_j} \right) + c_1 \frac{G\epsilon}{k} - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} + S^\epsilon \quad (9)$$

Onde os termos C_μ ; σ_k ; σ_ϵ ; c_1 e c_2 , são constantes do modelo dadas na Tabela 2, já os termos S^k e S^ϵ , são os termos fonte de energia cinética e dissipação turbulenta:

Tabela 2 – Constantes utilizadas no modelo k- ϵ

C_μ	σ_k	σ_ϵ	c_1	c_2
0,09	1	1,3	1,44	1,92

Fonte: Adaptado de (JÚNIOR, 2011)

A discussão sobre a avaliação dos modelos de turbulência será mostrada posteriormente.

3.4.4 Modelos de fechamento de balanço: Modelos de transferência de momento interfacial

O termo M_i da equação 2, relaciona os termos de transferência de momento interfacial cuja presença em escoamentos multicomponente e ou multifásicos é corrente, devido as interações entre as demais fases ou componentes envolvidas.

A força de arraste é gerada pelo atrito entre as partículas e a fase continua, essa força é presente em grande parte dos escoamentos dispersos esse modelo é descrito pelas equações (10) e (11), abaixo (NYGREN, 2014).

$$M_{ij}^A = c_{ij}^D (u_i - u_j) \quad (10)$$

$$c_{ij}^D = \frac{C_d}{8} A_{ij} \rho_i |u_i - u_j| \quad (11)$$

Onde os termos c_{ij}^D , C_d e A_{ij} são os termo de arraste interfacial, coeficiente de arraste e a área interfacial entre as fases, respectivamente.

Para partículas esféricas em um escoamento com baixa densidade o modelo de Schiller e Naumann (1993), que relaciona o coeficiente de arraste com o número de Reynolds da partícula, conforme a equação (12):

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0,15Re_p^{0,687})/Re_p & Re_p \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (12)$$

Porém esse modelo apresenta limitações, por somente avaliar o domínio disperso como esferas, o que só pode ser considerado aceitável em escoamentos borbulhantes com diâmetros relativamente baixos.

Assim, para avaliar a deformação das bolhas durante o escoamento é possível encontrar dois modelos em destaque o modelo de Ishii-Zuber (ANSYS, 2009) e o modelo de Grace (NYGREN, 2014).

O modelo de Grace avalia a deformação da bolha em possíveis formatos: esférico; elipsoidal e cap, sendo esses relacionados aos números de Morton e Eotvos conforme as equações (13) a (17) abaixo:

$$Eo = \frac{g(\rho_i - \rho_j)d_p^2}{\sigma} \quad (13)$$

$$Mo = \frac{g\mu_i^4(\rho_i - \rho_j)}{\rho_1^2\sigma^3} \quad (14)$$

$$C_{Delip} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{Eo^3}{Mo}} \frac{Mo^{0,298}}{\left[3, 42 \left(\frac{4}{3} Eo Mo^{-0,149} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{ref}}\right)\right)^{-0,14}\right]^2} \quad (15)$$

$$C_{Dcap} = \frac{8}{3} \quad (16)$$

$$C_D = \max(\min(C_{Delip}, C_{Dcap}), C_{Desf}) \quad (17)$$

Onde os termos C_{Delip} , C_{Dcap} , C_{Desf} , Eo , Mo e μ_{ref} , são respectivamente, os coeficientes de arrasto para as bolhas com formato esférico, cap, esférico, número de Eotvos, número de Morton e a viscosidade de referência que é $0,0009 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$.

O termo C_{Desf} é obtido pelo modelo de Schiller-Nauman, apesar de gerar um esforço computacional maior esse modelo garante um ajuste do coeficiente de arrasto automático em alguns *softwares* comerciais (NYGREN, 2014).

As forças que interagem com as fases surgem de efeitos físicos independentes, que para fluxos borbulhantes se destaca a: Forças de arrasto, porém para um melhor entendimento do escoamento outras forças podem ser observadas como as: Forças de massa virtual; dispersão turbulenta e sustentação (MCCLURE et al., 2014).

A força de massa virtual, surge da aceleração da fase dispersa em relação a fase contínua, devido ao deslocamento que as partículas tem que fazer em seu movimento, a equação descreve essa força (NYGREN, 2014).

$$M_i^{VM} = C_{vm}\alpha_i\rho_i \left(\frac{Du_i}{Dt} - \frac{Du_j}{Dt} \right) \quad (18)$$

Onde o termo C_{vm} é uma constante que depende do tamanho e concentração da partícula, em muitos trabalhos esse termo é dado por 0,5 (ANSYS, 2009). Devido ao tamanho reduzido que as bolhas possuem, nesses tipos de escoamento, existe a tendência dessas atingirem a velocidade terminal muito rapidamente, assim a parcela de interação dessa força é baixa (MCCLURE et al., 2014).

A força de dispersão turbulenta ocorre pelo transporte da fase dispersa de maior concentração para a fase de menor concentração realizada pela formação de vórtices da fase contínua ou devido ao movimento turbulento deste (SILVA et al., 2012), para um escoamento multifásico esta força está descrita pela equação:

$$M_i^{DT} = -M_j^{DT} = \overline{C_{ij}} \frac{v_{ti}}{\sigma_{\alpha i}} \left(\frac{\nabla \overline{\alpha_j}}{\overline{\alpha_j}} - \frac{\nabla \overline{\alpha_i}}{\overline{\alpha_i}} \right) \quad (19)$$

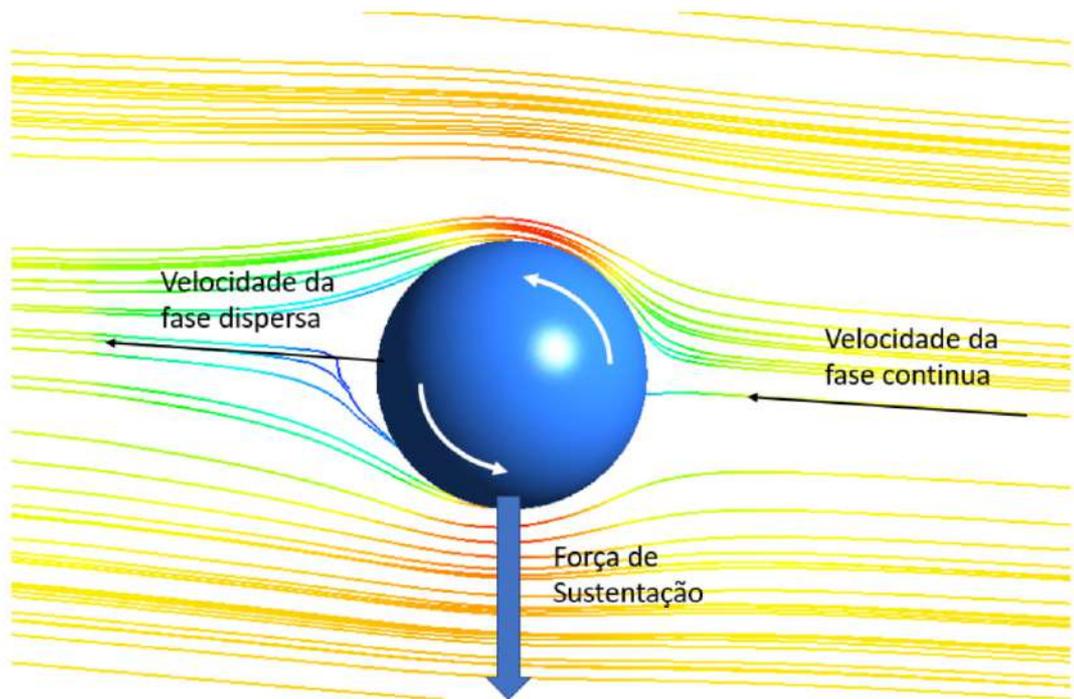
Os termos $\overline{C_{ij}}$ e $\sigma_{\alpha i}$, são o coeficiente de transferência de momento para a interface por força de arrasto e o número de Schmidt para a fase contínua, que pode ser representado por 0,9 (ANSYS, 2009).

Para Silva et al. (2012), essa força possui boa significância na predição das frações de gás em colunas assim com seus perfis de velocidade. Já em Sokolichin et al. (2004), a dispersão da

fase contínua na fase dispersa afetou o seu modelo, sendo assim sugerido pelo autor a utilização de modelos de avaliação desta variável.

A força de sustentação age devido a força de cisalhamento e ou vorticidade da fase contínua sobre a fase dispersa gerando um efeito rotacional nessa, como pode ser observada na Figura 13 abaixo:

Figura 13 – Efeito rotacional gerado pela fase contínua na fase dispersa



Fonte: Autor (2019)

Ainda na Figura 13, o movimento do fluxo na partícula, gera uma força perpendicular ao movimento devido a rotação desta, gerando um campo assimétrico de pressão conforme pode ser observado pelas linhas vermelhas na figura. A direção desta força é função da direção do fluxo assim podendo assumir qualquer posição perpendicular a partícula no domínio físico (MALISKA et al., 2008). A força de sustentação é modelada pela equação (20).

$$M_i^S = \alpha_i \rho_i C_l (u_i - u_j) \times (\nabla \times u_j) \quad (20)$$

Onde C_l é o coeficiente de sustentação, esse coeficiente é bastante difícil de ser estimado, devido aos gradientes locais de velocidade, porém alguns autores procuram relacionar esse termo

com números adimensionais como o número de Eotvos, conforme Tomiyama (1998).

No trabalho de Sokolichin et al. (2004), mostra que há uma baixa influência das forças de sustentação no escoamento de uma coluna de borbulhamento ao se comparar com as demais forças que atuam no sistema.

Já Ekambara e Dhotre (2010), avaliou os modelos de turbulência em um escoamento borbulhante em uma coluna cilíndrica, utilizando todas as forças de não arraste, observando que os modelos de turbulência baseado na RANS se aproximaram dos valores experimentais para fluxos mais anisotrópicos, que há bastante variação de posição, destacando-se os modelos $k - \omega$ e $k - \epsilon$.

Em Ortiz et al. (2012) foi avaliada a fração volumétrica de ar em um sistema ar-água em um leito de jorro, os autores utilizaram para o modelo $k - \epsilon$ para a modelagem da turbulência obtendo boas aproximações, assim como utilizando o modelo de Grace para modelar o arraste das bolhas.

Em Ribeiro (2012), foi utilizado o modelo $k - \epsilon$ para simular uma coluna de flotação para separação de minerais e óleo emulsionado, utilizando apenas o modelo de arraste para simular as transferências de momento entre as fases envolvidas, obtendo bons resultados na modelagem.

Para Silva et al. (2012), utilizando uma coluna de bolhas cilíndrica observou que as forças de dispersão turbulenta e de sustentação tiveram dificuldades para ajusta-las com os parâmetros encontrados na literatura, sendo o modelo de turbulência $k - \epsilon$, o modelo que melhor se ajustou as condições experimentais.

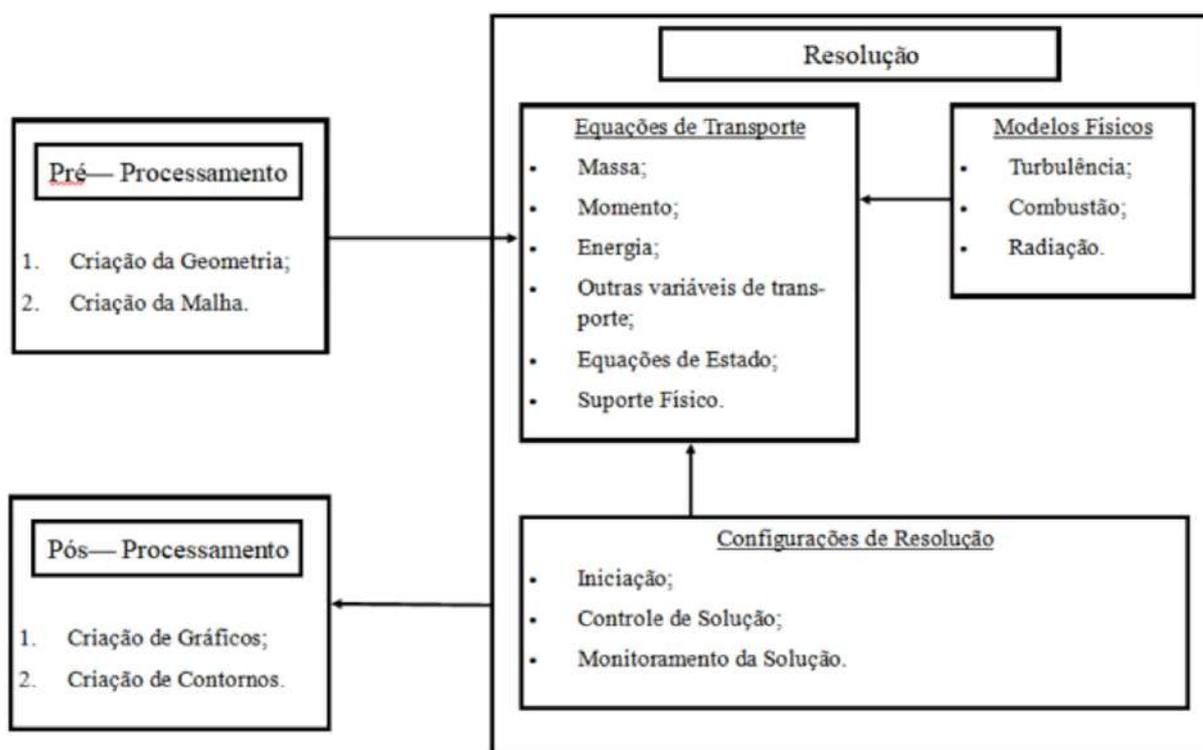
3.4.5 Computação Fluidodinâmica

Fluidodinâmica computacional é um ramo da ciência teórica, aplicada ao desenvolvimento de ferramentas computacionais para a análise baseada em dinâmica dos fluidos, assim como transferência de calor e massa (SHARMA, 2016).

O aprimoramento dessas técnicas é de fundamental importância nos campos da ciência e engenharia. Uma delas a engenharia química por causa do grande número de operações desenvolvidas em fase fluida, totalmente ou parcialmente. Assim a análise do escoamento permite melhores resultados para processos reduzindo custos em seus projetos (WILKES; BIRMINGHAM, 2006).

Os novos pacotes computacionais de análise fluidodinâmica se baseiam em um algoritmo de resolução baseando em etapas que consistem em: (1) Pré – Processamento; (2) Resolução ; (3) Pós – Processamento, conforme a Figura 14 (TU et al., 2018)

Figura 14 – Algoritmo e interconexão dos elementos dos principais softwares de fluidodinâmica computacional



Fonte: Adaptado de: (TU et al., 2018)

O pré-processamento é a etapa cuja a necessidade é de delimitar o domínio físico a ser estudado, definido pela geometria e sua discretização em pequenos objetos nomeados como elementos. Essa etapa possui uma grande importância pois nela é onde são definidos o grau de refinamento da resposta assim como o esforço computacional necessário para a análise.

A discretização do domínio físico possui a vantagem de uma avaliação discreta no domínio físico. Cada elemento da estrutura criada possui dois tipos de estruturas: elemento, domínio onde serão aplicadas as equações de balanço e fechamento, nós, pontos de conexão entre os elementos da malha sendo compartilhado as condições iniciais e de contorno entre os elementos da malha (MALISKA, 2017).

Torna-se intuitivo dizer que quanto maior a proporção de elementos de uma malha, mais próximo da fidelidade o modelo se encontrará, porém o custo computacional envolvido nessa análise será muitas vezes maior quanto mais elementos forem atribuídos a análise. Podendo ser visto em comparação com problemas bidimensionais com tridimensionais, o qual ao dobramos o número de variáveis analisadas temos um custo computacional 4 vezes maior para problemas bidimensionais e 8 vezes maior para tridimensionais (FORTUNA, 2012).

Em relação a estrutura da malha, pode-se dividir em dois campos: malhas estruturadas coincidentes com as fronteiras e não estruturadas. Nas malhas estruturadas é necessário a aplicação de procedimentos especiais ao analisar geometrias mais complexas, muitas vezes gerados separadamente da geometria e depois transferidos para a mesma, muitas vezes utilizando elementos hexaédricos.

O mesmo já não ocorre nas malhas não estruturadas, pois a discretização do domínio é feita de maneira mais facilitada para qualquer geometria, muitas vezes com a utilização de elementos tetraédricos, porém sendo necessário uma melhor estrutura de dados para os softwares (FORTUNA, 2012).

Com o crescimento da acessibilidade a grande poder computacional aliada a facilidade da aplicação de malhas não estruturadas, e visível o crescimento na sua utilização, podendo citar os trabalhos de VERGEL (2013), que utilizou uma malha não estruturada para aplicação em tanques agitados observando que a precisão dos seus resultados depende do grau de refinamento da malha. Já em Gropp et al. (2000) avaliaram a performance de malhas não estruturadas na avaliação de grandes máquinas, obtendo bons resultados com ressalvas aos tamanhos das malhas.

Na etapa (2) é realizada a resolução das equações relacionadas ao modelo físico estudado, para todos os elementos da malha. O método mais difundido para a fluidodinâmica computacional é o método de volumes finitos devido as vantagens atribuídas a esse método que são (POTTER; WIGGERT, 2003):

- Mantém a conservação dos modelos, massa, energia e momento;
- Não necessidade regular dos elementos, podendo ter elementos que assumam várias formas [Malhas não estruturadas]

A integração das soluções é realizada por meio do método dos resíduos ponderados, que busca encontrar o mínimo resíduo através da equação 21 (CHAPRA; CANALE, 2008):

$$\int_V RW_i dV = 0 \quad (21)$$

Onde R é a função residual, que é constituída das equações de balanço e W_i são as ponderações, para o método de volumes finitos esse valor é 1, assim essa equação fornece o balanços para cada elemento da malha (MALISKA, 2017).

Por fim, na etapa (3), consiste na análise dos dados gerados pelo modelo, sendo verificada a sua consistência e representabilidade.

Em geral, problemas envolvendo escoamentos complexos podem gerar grandes números de dados e um considerável esforço computacional, desta forma a formatação e geração da malha adequada é crucial para a resolução do problema de maneira adequada (FORTUNA, 2012).

4 Metodologia

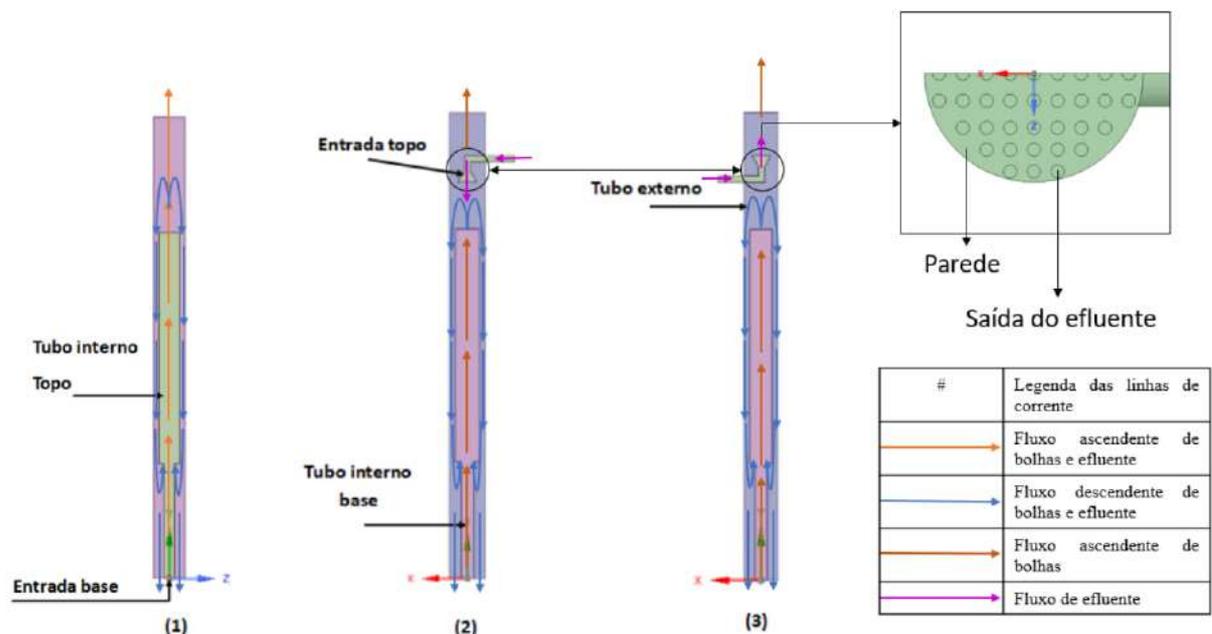
O objetivo das análises CFD foi de observar a influência de variáveis geométricas e operacionais em colunas de flotação com o efeito *airlift*, sendo essas: Influência da entrada do efluente; Velocidade de entrada do efluente; Velocidade de entrada das bolhas; Vazão de retirada no fundo da coluna.

4.1 GEOMETRIA

No seguinte estudo foram utilizadas colunas de flotação com o efeito *airlift* desenvolvidas pelo software *Ansys Spaceclaim*[®], *software* de geração de geometrias do pacote *Ansys*, baseado nas geometrias de Marinho (2015), Qi et al. (2013) e He et al. (1995), em função ao desenho e ao posicionamento das suas entradas.

As geometrias possuem semelhanças de construção, tais como altura e diâmetros dos tubos, sendo diferente, apenas, a posição das entradas dos efluentes, sendo adicionado - nas geometrias (2) e (3) - um distribuidor de fluxo, conforme podemos observar na Figura 15, a Tabela 3 Apresenta as dimensões utilizadas nas três colunas estudadas.

Figura 15 – Geometria das colunas utilizadas relacionada a alimentação do efluente: (1) alimentação pela base; (2) alimentação pelo topo em contra corrente; (3) alimentação pelo topo co-corrente



Fonte: Autor (2019)

Tabela 3 – Geometria do do sistema analisado

Espaço	Dimensão	Coluna [mm]		
		(1)	(2)	(3)
Tubo externo	Diâmetro	152,4	152,4	152,4
	Comprimento	2000	2000	2000
Tubo interno base	Diâmetro	50,8	50,8	50,8
	Comprimento	500	500	500
Tubo interno topo	Diâmetro	101,6	101,6	101,6
	Comprimento	1000	1000	1000
Alimentação do efluente, em relação a base		0	1800	1700

Fonte: Autor (2019)

Em relação as entradas das colunas da Figura 15 (2) e (3), a entrada da alimentação do efluente no topo, possui tubulações possuem 25,4 mm de diâmetro.

As colunas demonstradas foram utilizadas para uma avaliação inicial de influência do posicionamento da alimentação de efluente na coluna.

4.2 GERAÇÃO DA MALHA

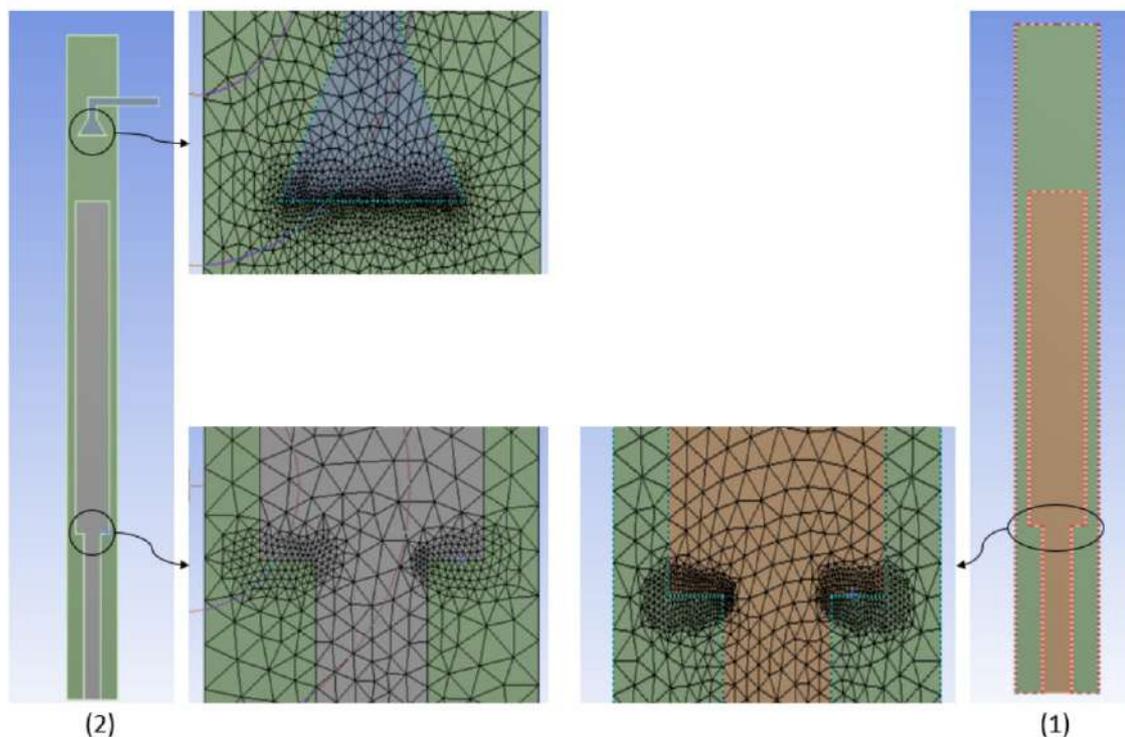
Para a criação da malha foi utilizado o pacote computacional *ANSYS Meshing*®, sendo elaboradas malhas tetraédrica não estruturada.

Atualmente malhas não estruturadas estão ganhando maior destaque devido a vantagem de fácil adaptação a geometrias mais complexas e ter uma geração de malha mais facilitada que para elementos mais estruturados (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A geração da malha, nesse pacote, permite a geração automatizada de malhas que podem levar em considerações alguns fatores como: tamanho de elementos, taxa de crescimento, facilidade do refino de regiões de interesse (VERGEL, 2013).

Todas as malhas geradas para o estudo das geometrias apresentam uma faixa semelhante de elementos de volume em seu domínio, 210.000 a 230.000 elementos, sendo refinadas em regiões de maior ocorrência de mistura das fases, como na região de recirculação e na entrada de efluentes, para as colunas (2) e (3), como pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 – Malhas elaboradas para as colunas (1) e (2)



Fonte: Autor (2019)

Para malhas não estruturadas, a maior quantidade de elementos pode gerar modelos mais precisos em relação aos resultados, nem sempre esse número é facilmente obtido, sendo muitas vezes necessário a análise mais apurada desses resultados, este será observado no estudo de caso mais a frente.

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA: CONSIDERAÇÕES DE ESTUDO, MODELOS UTILIZADOS E MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

foram utilizadas as hipóteses simplificadoras para a solução do modelo:

- Estado estacionário;
- Sistema ternário - água; ar e óleo - isotérmico submetido a pressão atmosférica externa;
- Ar e óleo são fluidos dispersos na água;
- Os efeitos da gravidade são considerados;
- Condição de não deslizamento na parede para o fluido contínuo;

- Deslizamento livre na parede para os dispersos;
- Fase dispersa não influencia a fase contínua;
- A fase contínua e a fase dispersa entram na coluna com mesma velocidade.

As condições iniciais do teste serão com a coluna toda preenchida com água e com fluxo estagnado ou seja as frações volumétricas de água e sua velocidade do meio são iguais a 1 e a 0, respectivamente. Para a resolução da simulação foram utilizados os modelos apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Modelos utilizados para a resolução da simulação

Abordagem	Euleriana - Euleriana
Modelo fenomenológico	Conservação de massa e momento
Modelo de turbulência	k- ϵ
Modelo de força de arraste	Grace
Modelo de forças de não arraste	<i>Favre averaged drag model</i>

A abordagem Euler-Euler, foi considerado no modelo pois a análise leva em conta as informações globais das fases, como fração volumétrica. Sendo assim esta abordagem mais recomendada e também mais utilizada na literatura.

Segundo Ribeiro (2012), a força de arraste para sistemas de borbulhamento possui maior relevância perante as demais forças interfaciais, como: sustentação; massa virtual e demais.

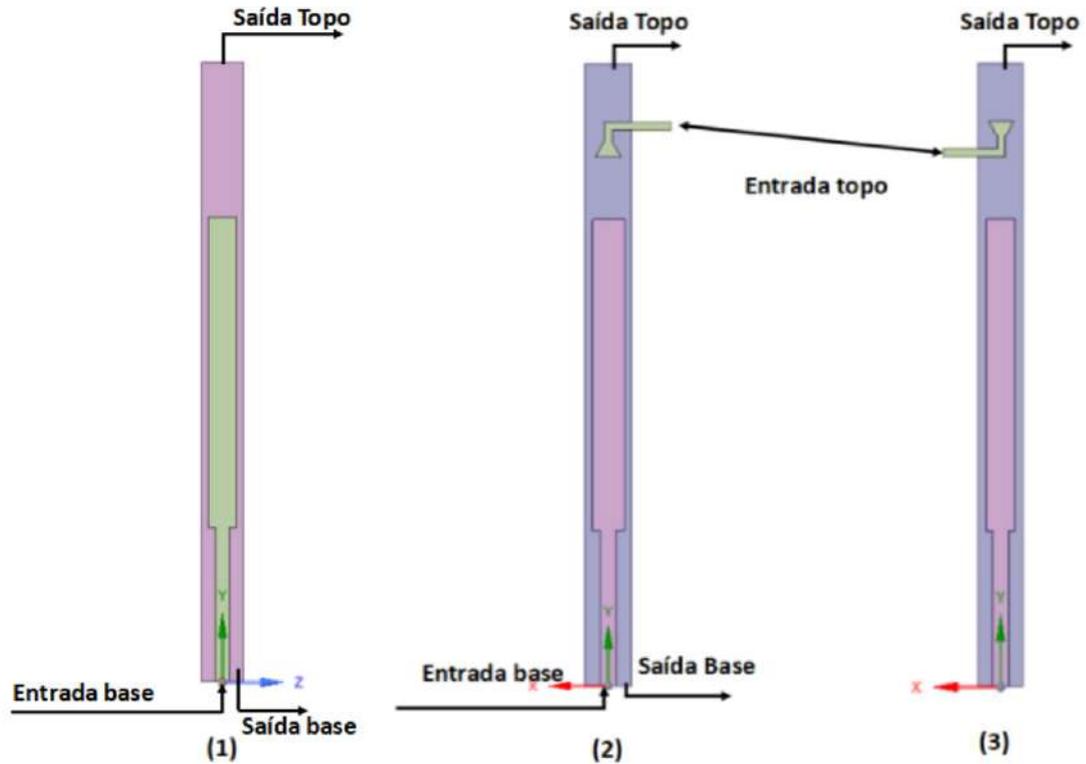
Da mesma forma está conclusão é observada no trabalho de Sokolichin et al. (2004), apenas com uma ressalva para a força de dispersão turbulenta. Desta maneira, para este trabalho serão apenas consideradas os modelos de fechamento de arraste e dispersão turbulenta.

O modelo de arraste de Grace utilizado nesta modelagem, consegue descrever o coeficiente de arraste com relação ao formato da bolha, como não será utilizado bolhas muito pequenas, esse modelo descreverá melhor esta variável.

O modelo de dispersão turbulenta de *Favre averaged drag model*, será utilizado pois, será assumido que a fase dispersa possui baixa influência na fase continua, fazendo com que este modelo possua boa aproximação com a realidade.

A coluna (1), Figura 17, possui uma entrada e duas saídas e as colunas (2) e (3) possuem duas entradas e duas saídas conforme a Figura 17.

Figura 17 – Entradas e saídas das colunas



Fonte: Autor (2019)

Foram considerados, para os fluidos dispersos, diâmetros médios de gota (óleo) e bolha (ar) de $44 \mu m$ e $3 mm$ respectivamente.

Esses valores foram obtidos dos trabalhos de (LI et al., 2007), para o óleo e (RAN et al., 2013), para o ar e serviram de base para os diâmetros médios do presente trabalho.

As frações volumétricas foram obtidas, de forma que a entrada de óleo obtivesse uma fração de aproximadamente 1000 ppm. Para o ar foi utilizada a Tabela 1, e com o auxílio das equações (22) e (23) (SHAMMAS et al., 2010):

$$C_2 = C_1 \times \frac{P_2}{P_1} \quad (22)$$

$$V_{bolhas} = C_2 - C_1 \quad (23)$$

Onde:

- V_{bolhas} Fração volumétrica de ar dentro do meio durante a despressurização;
- C_1 Fração volumétrica na pressão de referência, para o está análise foi utilizado como referência a pressão de 1 atm a temperatura de $25^\circ C$;

- C_2 Fração volumétrica na pressão do saturador, para esta análise será de $4,5 \text{ kgf/cm}^2$;
- P_1 Pressão de referência;
- P_1 Pressão do tanque saturador.

A inserção das tensões superficiais dos fluidos dispersos com o fluido contínuo são variáveis necessárias para a criação de um modelo de partículas no sistema.

A consideração de *Zero Gradient* para as frações volumétricas de topo significa que as variações dessas frações não se alteram no topo ou possuem uma taxa de variação mínima, dessa forma, tendo um fluxo totalmente desenvolvido (ANSYS, 2012).

Com a Equação 23, obteve-se as frações volumétricas do ar na alimentação do flutador para as colunas (1), (2) e (3), sendo utilizadas como condições de contorno e sendo apresentadas nas Tabelas 6 e 7

Tabela 5 – Condições de contorno utilizadas na coluna (1)

Variável	Óleo	Água	Ar
Fração volumétrica entrada	0,0011	0,9388	0,0600
Fração volumétrica saída - topo	<i>Zero Gradiente</i>	<i>Zero Gradiente</i>	<i>Zero Gradiente</i>

Fonte: Autor (2019)

Tabela 6 – Condições de contorno utilizadas na coluna (2) e (3)

Variável	Óleo	Água	Ar
Fração volumétrica entrada - Base	0	0,9400	0,0600
Fração volumétrica entrada - Topo	0,0011	0,9989	0
Fração volumétrica saída - topo	<i>Zero Gradiente</i>	<i>Zero Gradiente</i>	<i>Zero Gradiente</i>

Fonte: Autor (2019)

Para todos os estudos foram utilizados como parâmetro de eficiência, dado pela equação 25, como avaliação da coluna, já os materiais utilizados para o estudo são descritos na Tabela 7, abaixo:

Tabela 7 – Propriedades utilizadas para o estudo

Material	Viscosidade [Pa.s]	Densidade [kg/m ³]	API	Tensão superficial ÁguaAr [N/m]	Tensão superficial ÁguaÓleo [N/m]
Ar	0,00001831	1,185	-	0,0720	-
Água	0,0008899	997,000	-		0,0307
Óleo	0,0545	878,033	29,5	-	

Fonte: (ANSYS, 2012; SÁNCHEZ-MINERO et al., 2014; ZOUAIN, 2012)

Os dados físicos do ar e da água foram obtidos do banco de dados do *software ANSYS CFX13* ©. Sendo as estimativas de viscosidade e densidade do óleo, obtidas através da relação de Beggs e Robinson (SÁNCHEZ-MINERO et al., 2014) e pela Equação 24, respectivamente, estas foram estimadas para um óleo de 29,5 de *API*°, medida média do óleo obtido no Rio Grande do Norte (ZOUAIN, 2012).

$$\rho = \frac{141,5}{API^\circ + 131,5} \quad (24)$$

4.4 ESTUDO DE CASO

4.4.1 Influência da posição da alimentação de efluente na coluna

A análise computacional para esta etapa do estudo, consiste na avaliação do posicionamento da alimentação de efluente na coluna, assim foram utilizadas os modelos da Figura 15, mantendo as condições de contorno semelhantes para a possível comparação destas ao final da análise, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Condições de contorno para o experimento numérico

Entrada			
Posição	Coluna (1)	Coluna (2)	Coluna (3)
Topo	0 [m/s]	0,01 [m/s]	0,01 [m/s]
Base	0,0225 [m/s]	0,02 [m/s]	0,02 [m/s]
Saída			
Topo	1 [atm]	1 [atm]	1 [atm]
Base	0,004 [m/s]	0,004 [m/s]	0,004 [m/s]

Fonte: Autor (2019)

Para que haja uma comparação entre os diferentes designs das colunas foi utilizado como base a vazão volumétrica para efetuar os cálculos das velocidades. Desta maneira permitiu-se que todas as colunas possuíssem condições semelhantes.

Com base na vazão volumétrica dos fluidos da entrada, utilizou como métrica para a vazão do efluente tratado, na base da coluna, uma porcentagem do total desta variável, para este estudo foi utilizado 70% da vazão volumétrica de entrada de fluidos total.

Os resultados serão avaliados qualitativamente, por perfis de concentração e quantitativamente, por meio da equação de eficiência de remoção:

$$\eta = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100\% \quad (25)$$

Onde:

- C_o Concentração inicial
- C_f Concentração final

Foi efetuado os demais estudos de caso com a coluna que obteve melhor eficiência de separação, dos perfis estudados nesta avaliação.

4.4.2 Influência da velocidade das bolhas

Esta etapa do estudo visa a observação da influência da velocidade de alimentação das bolhas na coluna. Esta variável foi alterada seguindo estas velocidades: 1, 2, 4, 6 *cm/s*.

As demais variáveis, velocidade do efluente; vazão de retirada do efluente tratado na base, foram mantidas constantes e iguais aos valores utilizados no estudo anterior, vide Tabela 8.

4.4.3 Influência da velocidade do efluente

De forma análoga ao item anterior, foi avaliada as velocidades na alimentação do efluente da coluna, fixando a velocidade das bolhas e mantida as condições descritas no item anterior, as quais serão avaliadas as velocidades de: 1, 2, 4 e 6 *cm/s*.

4.4.4 Influência da vazão de remoção do efluente tratado ao fundo da coluna

Mantendo-se constante as variáveis de velocidade de alimentação de efluente e de bolhas, foi alterada a porcentagem da vazão volumétrica de efluente que se remove ao fundo da coluna, assim foram utilizados para este estudo as seguintes porcentagens: 40, 50, 60 e 70%.

4.4.5 Influência do refinamento da malha na precisão do estudo

Para a geração da malha, foram realizadas quatro simulações para verificar a independência dos resultados em relação a malha de acordo com o esforço computacional utilizado para a resolução das equações.

Para isso foi realizado o teste na geometria da Figura 17 (2), com as seguintes condições de contorno:

- Sistema ternário: ar; água e óleo;
- Entrada de efluente no topo (água e óleo): 2 cm/s;
- Entrada de bolhas na base (água e ar): 2 cm/s;
- Topo: Aberto : 1 atm;
- Saída base: 60% da vazão de entrada da coluna

Foi utilizada a métrica da eficiência de remoção de óleo, Equação 25, para a comparação dos resultados encontrados nas malhas estudadas.

A avaliação dos resultados para esse teste foi a diminuição do erro relativo dos resultados, entre cada resultado obtido, frente ao número de elementos utilizados e o tempo computacional gasto para a realização destes testes, a Tabela 9 mostra a categorização dos elementos utilizados no teste.

Tabela 9 – Elementos analisados nos testes de malha

Malha	Nós	Elementos
1	17.655	95.263
2	38.499	212.857
3	74.073	415.963
4	85.080	479.313

Fonte: Autor (2019)

O computador utilizado para obter os resultados das simulações deste estudo possui as seguintes configurações:

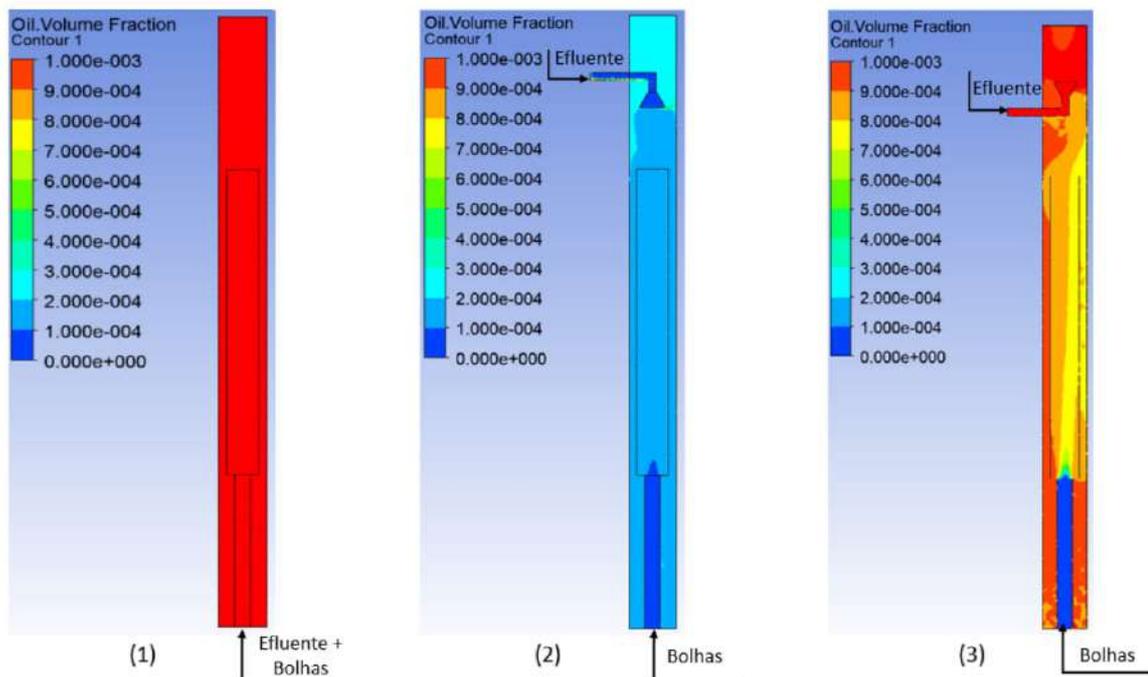
- Processador: Intel Core i7-7700HQ 2.80 GHz;
- Memória RAM DDR3 16 Gb;
- Placa de video: Geforce GTX 1050 4 GB;

5 Resultados e Discussões

5.1 INFLUÊNCIA DA ENTRADA DOS EFLUENTES NA COLUNA

Foi utilizado os perfis de fração de óleo nas colunas, Figura 18, para a análise da distribuição do rejeito na coluna e como a hidrodinâmica interna está afetando esse comportamento.

Figura 18 – Fração volumétrica de óleo nas colunas estudadas



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 18 é observado uma grande concentração do óleo na área da coluna da coluna(1), comparando a extensão da fração analisada.

A fração de óleo é praticamente homogênea em toda extensão da coluna, o que pode ter sido provocado pela baixa eficiência de separação de óleo.

Um motivo para esse comportamento pode ser pela entrada utilizada no estudo, pois a forma de entrada desta pode gerar turbulência em demasia, podendo haver o colapso das bolhas de ar, prejudicando o contato entre as fases.

A turbulência inicial, colapso das bolhas podem gerar uma menor eficiência de colisão entre as partículas, dessa maneira causando a estagnação da fase oleosa ao longo da coluna (1), como pode ser observado na Figura 18.

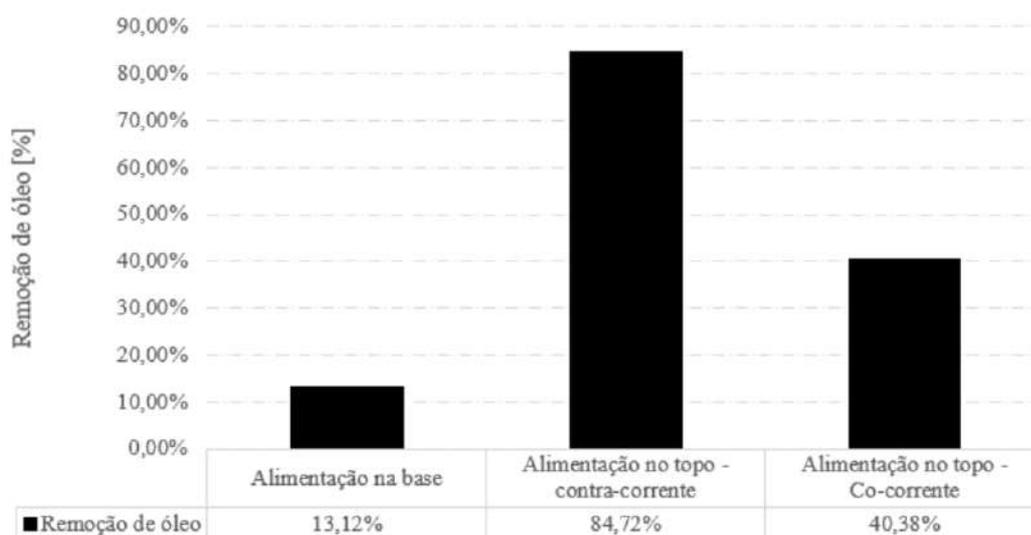
Possuindo entradas de efluentes na região superior da coluna, pode-se observar uma melhor distribuição de óleo no equipamento, se comparado com a coluna (1).

Comparando apenas as colunas (2) e (3) é notório a diferença entre as frações oleosas na coluna. Em (2) há uma alimentação contra-corrente em relação a alimentação de efluente e de bolhas. Esse contato aparenta ser bastante benéfico para a separação, pois é observada a clara separação entre área mais concentrada ao topo e menos concentrada ao fundo.

A coluna (2), apresenta um perfil mais brando de fração de óleo havendo uma distinção entre a fase mais concentrada no topo que na base, o que não ocorre na coluna (1) e pouco na coluna (3).

Em Nagase et al. (1998) foi observado um melhor contato entre as bolhas do seu reator em um formato contra corrente, tendo um efeito semelhante ocorrido pelo direcionamento do dispersor da coluna (2), estando esse em contra-corrente ao fluxo ascendente das bolhas na base. A análise quantitativamente as eficiências das colunas pode ser observado na Figura 19

Figura 19 – Fração volumétrica de óleo nas colunas estudadas



Fonte: Autor (2019)

Pela Figura 19 observou que a coluna com alimentação no topo - contra-corrente ou a coluna (2), propiciou melhor eficiência de separação, possuindo um valor de quase 8 vezes a eficiência da coluna com a alimentação na base ou coluna (1) e mais que o dobro da coluna com alimentação no topo - co-corrente ou coluna (3).

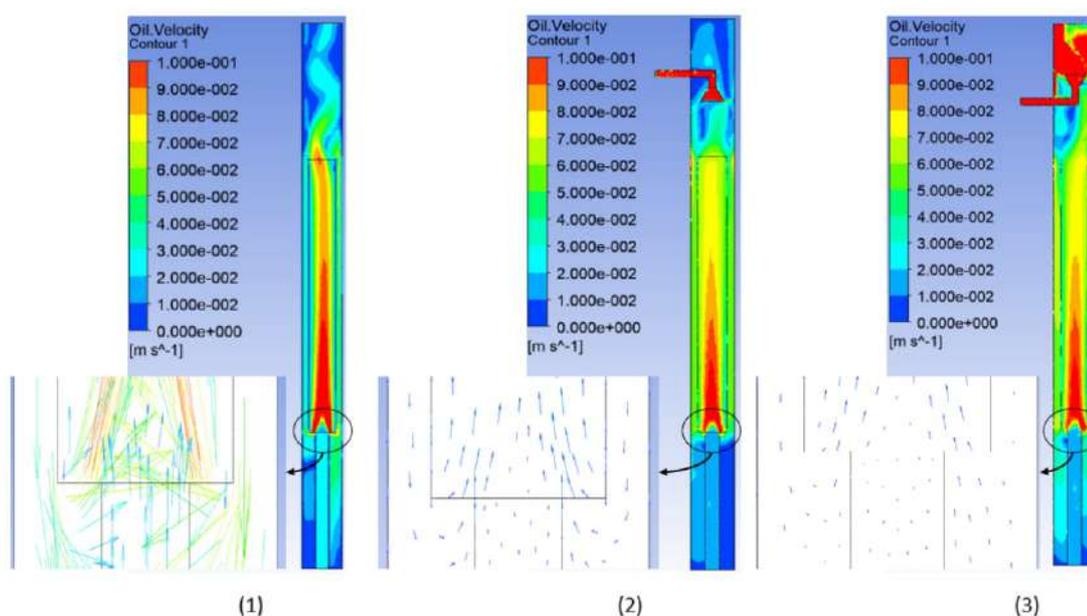
Assim como foi observado avaliando os perfis de concentração oleosa na coluna, Figura

18, o gráfico nos mostra a dimensão dos efeitos hidrodinâmicos na localização da alimentação nesta coluna.

Observando em trabalhos da literatura, pode-se observar que o formato contra-corrente torna esse contato mais eficiente, pois as partículas vão entrar em contato intimamente direto, diferente das colunas (1) e (3).

Analisando os efeitos do *airlift* gerado na região entre tubos internos, pode-se observar como essa recirculação da fase oleosa beneficia o contato entre a fase das bolhas ascendente com a fase oleosa, conforme a Figura 20

Figura 20 – Perfis de velocidade do óleo nas colunas e o direcionamento do fluxo na região de recirculação



Fonte: Autor (2019)

Observando a Figura 20, verificamos um fluxo desordenado e caótico na região de recirculação na coluna (1), um fluxo mais ordenada e menos caótico nas colunas (2) e (3), podendo ser observado na região em destaque na Figura 20.

Se associar este comportamento com as eficiências observadas na Figura 19, podemos destacar uma ação da hidrodinâmica da coluna frente a eficiência de remoção de óleo.

O movimento caótico das gotículas de óleo na coluna (1) faz com que a adesão entre o corpo bolha-gotícula seja prejudicado, devido aos vórtices ou colapso das fases, diminuindo a eficiência da flotação para esse perfil. Para o perfil (3), as gotículas aparentemente não possuem

força suficiente para serem atraídas para a região de recirculação.

Assim, se pode concluir que a turbulência observada na zona de recirculação, pode gerar resultados ineficientes de separação em elevados graus, pois permite um contato entre as gotículas e bolhas bastante ineficiente.

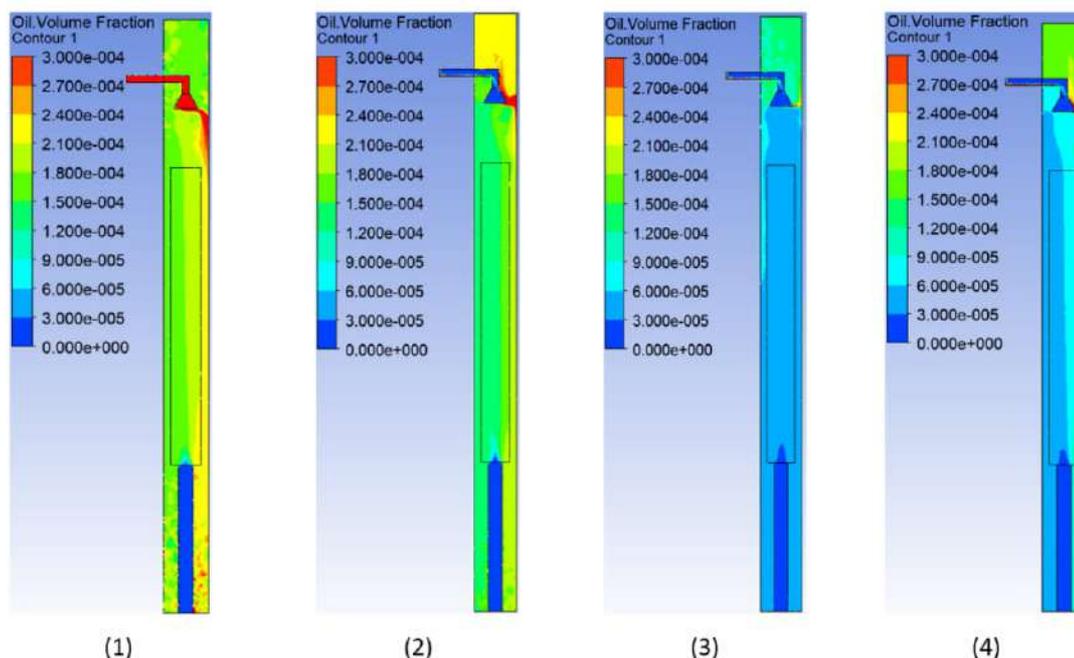
De maneira geral, a coluna (2) apresentou uma eficiência de remoção de óleo mais significativa que os outros perfis estudados, assim para as demais etapas do estudo este perfil será utilizado para as demais análises.

5.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ENTRADA DAS BOLHAS

Utilizando a coluna (2) para essa sessão de análise, foram empregadas 4 velocidades de entrada de bolhas na base, sendo mantidas constantes e iguais as outras condições de fluxo, alimentação de efluente e remoção de efluente na base, iguais aos aplicados na secção anterior.

Avaliando as frações volumétricas de óleo para as 4 velocidades, ilustrado na Figura 21, analisadas pode-se observar um padrão o qual a medida que a velocidade das bolhas aumenta a fração volumétrica do óleo na região da base da coluna diminui.

Figura 21 – Perfis de fração volumétrica de óleo na coluna 2: 1 = 1 cm/s; 2 = 2 cm/s; 3 = 4 cm/s; 4 = 6 cm/s

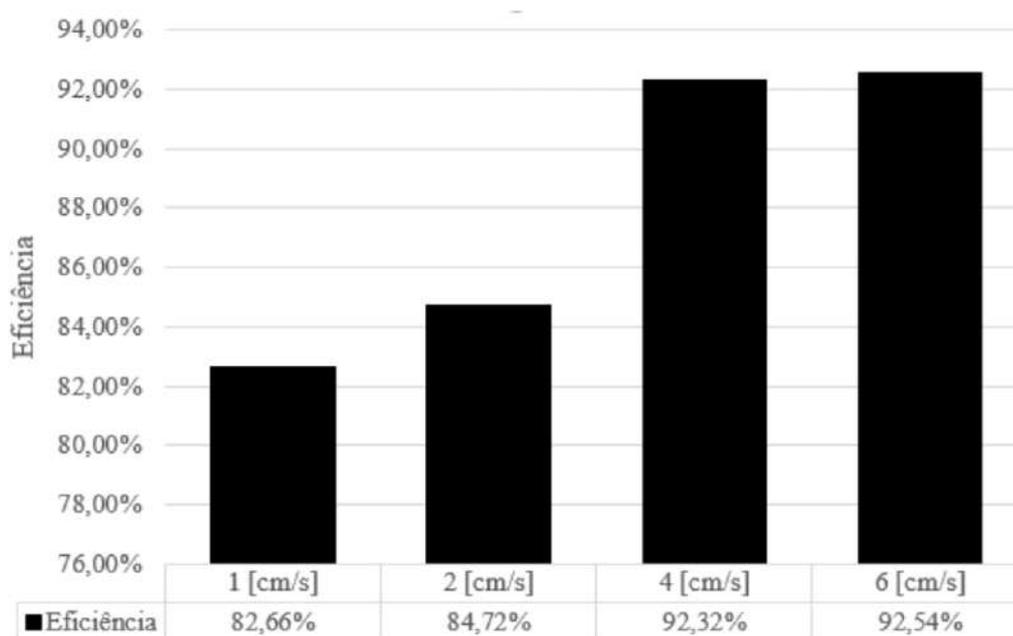


Ainda na Figura 21, observamos que a medida que a velocidade das bolhas a formação de regiões com maior concentração de óleo ao topo e menos concentrada na base, o que fica evidente na progressão de velocidades de ascensão das bolhas da Figura 21.

Pode-se notar comparando as Figuras 21 (1) e (4), em (1) a velocidade das bolhas não é suficiente para conduzir as gotículas de óleo para a superfície, o qual pode ser observado pelo direcionamento descendente que a zona vermelha toma na coluna.

Em (4), é observado que a entrada do efluente, mais concentrada em óleo, é mantida na região superior da coluna, verificando, que a fase gasosa possui força de agregação suficiente para flotar a camada oleosa alimentada na coluna. Na Figura 22 é ilustrada a eficiência de remoção do óleo em todas as simulações estudadas.

Figura 22 – Eficiência na coluna 2 pela velocidade de entrada das bolhas



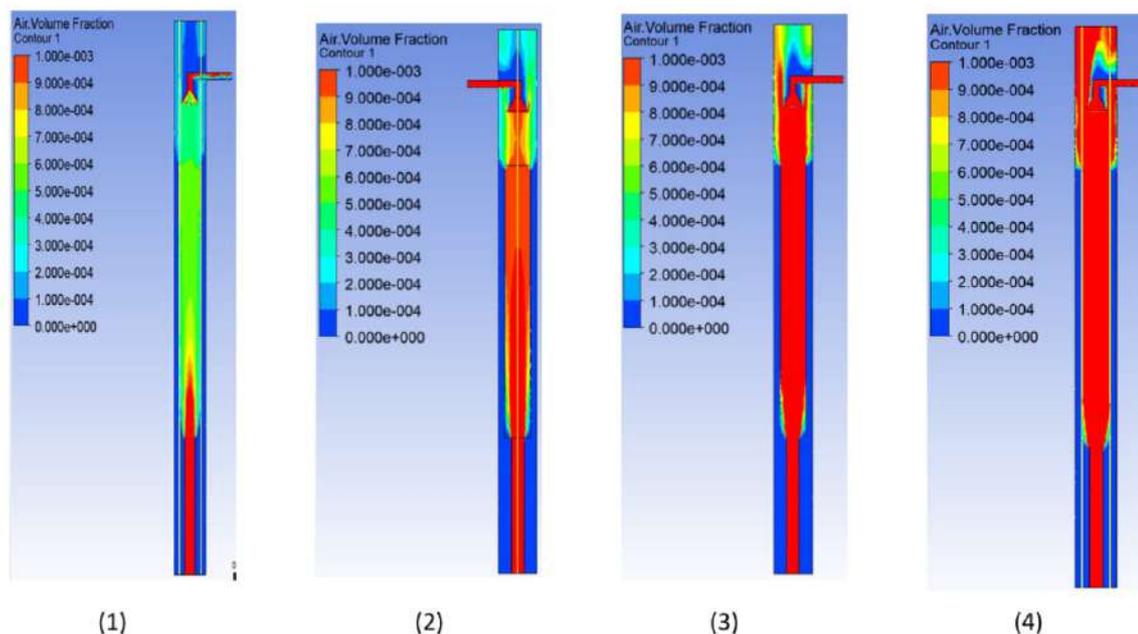
Fonte: Autor (2019)

Como percebido na Figura 21, a maior velocidade do ar influi no perfil de fração volumétrica de óleo na coluna, assim pode-se observar na influência da eficiência de separação do equipamento, onde há um aumento de quase 9% ao aumentar a velocidade de bolhas de 2 cm/s para 4 cm/s, sendo mantida quase que igual ao aumentar esta de 4 para 6 cm/s.

Sabe-se que para esta etapa do estudo a concentração de óleo e a velocidade de entrada deste na coluna foram mantidas constantes, assim ao aumentar a fração de ar, em decorrência do aumento da vazão deste.

O contato entre as fases é aumentado devido a maior área de superfície gerada pela adição de mais bolhas, conforme observado em Ran et al. (2013). Esse fenômeno pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Fração volumétrica de ar coluna 2: 1 = 1 cm/s; 2 = 2 cm/s; 3 = 4 cm/s; 4 = 6 cm/s



Fonte: Autor (2019)

Ran et al. (2013) observaram em seu estudo que esse aumento na eficiência pelo aumento da concentração de ar na coluna possui um limite, devido ao incremento da turbulência na coluna, que podem gerar o colapso das bolhas de ar, prejudicando o contato entre as fases.

Comparando as Figuras 21 (3) e (4) cujas eficiências de separação apresentaram comportamentos semelhantes. Pode-se notar que em (3) a distinção da zona mais concentrada ao topo e da menos concentrada no fundo da coluna é diferente da observada em (4), onde é verificado uma adição de concentração na lateral da coluna, o que pode indicar o limite de velocidade que esta coluna proposta suporta.

Sendo melhor observado ao analisar a Figura 22, o qual nota-se que a variação da eficiência entre essas duas velocidades é menor que a observada em (2) e (3), concluindo, de acordo com os trabalhos de Ran et al. (2013) e Qi et al. (2013), que este limiar de turbulência suportada por esta coluna se encontra próximo a região de 4 a 6 cm/s.

Pode-se observar, assim que a vazão de ar é bastante influente para a separação entre o óleo e a água, como pode ser observado na Figura 22. Esse fenômeno pode-se decorrer pelo

grande volume de ar formado na região de descarga do efluente na coluna.

Comparando as Figuras 21 e 23, pode-se verificar que a medida que a concentração fica mais intensa no topo da coluna maior é a eficiência de separação desta.

Porém algo que pode ser encontrado na literatura, como em Ran et al. (2013) e Qi et al. (2013), é a desestabilização da coluna devido ação da alta turbulência das bolhas ocasionada pela maior vazão de gás na coluna, apesar de não ser observado nesta parte do estudo, pode-se supor que este fenômeno esteja próximo a acontecer, neste estudo, devido a estabilização da eficiência da coluna.

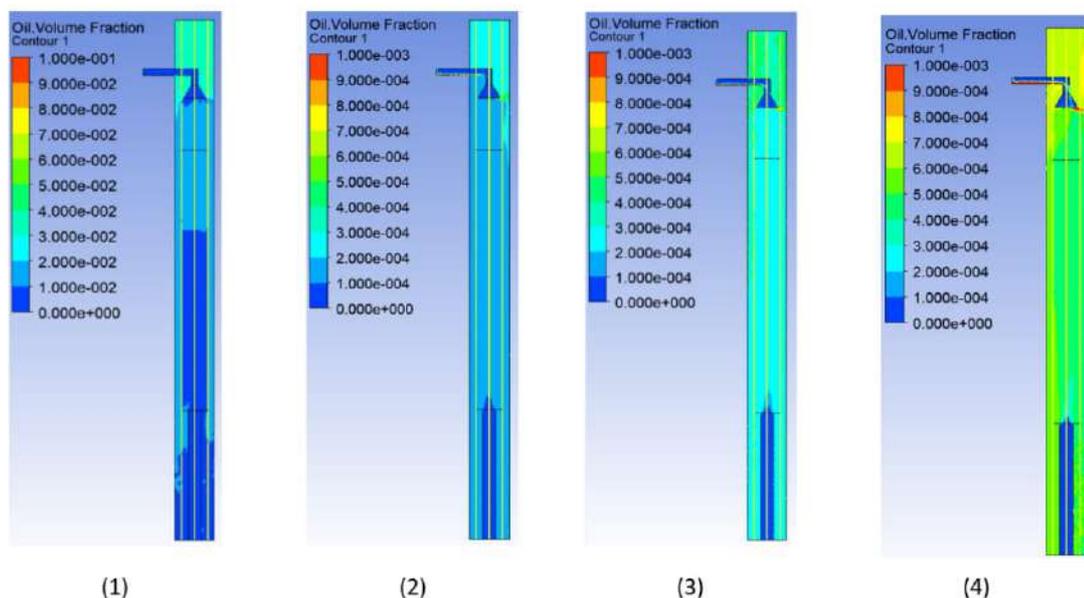
Entretanto pode-se observar nesta secção, a influência positiva do aumento da vazão de gás e vislumbrar uma região ótima de trabalho para essas condições analisadas.

Deve-se levar em conta que a velocidade de ar suportada pela coluna, pode variar de acordo com a área da secção transversal da coluna estudada, assim, quanto maior o diâmetro é esperado um aumento desse limiar de turbulência, propiciando uma maior velocidade das bolhas.

5.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ENTRADA DO EFLUENTE

Mantendo as condições avaliadas na coluna (2), na secção 5.1, apenas variando as velocidades de alimentação dos efluentes na coluna pode-se observar os perfis de fração volumétrica de óleo na coluna, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Perfil de fração volumétrica de óleo na coluna (2): 1 = 1 cm/s; 2 = 2 cm/s; 3 = 4 cm/s; 4 = 6 cm/s

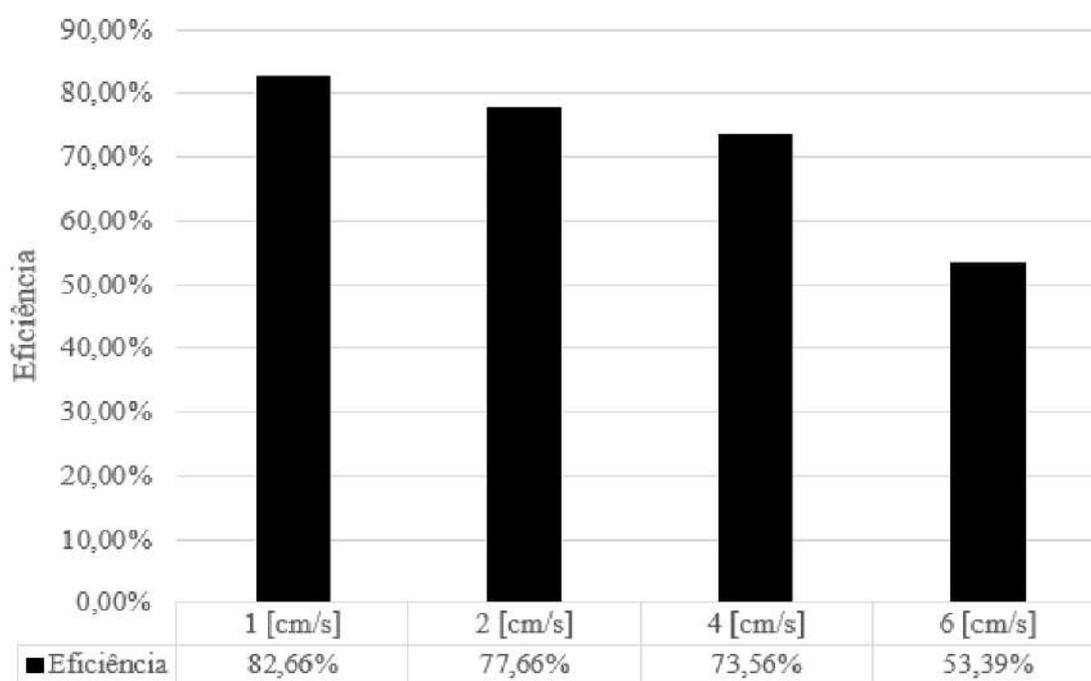


Fonte: Autor (2019)

A Figura 24, mostra um aumento da fração volumétrica de óleo em torno da coluna a medida que o fluxo de efluente é acrescido, podendo constatar um fenômeno inverso ao ocorrido na secção anterior.

Mantendo constante a vazão de bolhas no fundo da coluna, pode-se constatar que esta coluna não comporta um alto fluxo de efluente para está velocidade de bolhas utilizada. A Figura 25 pode ser observado a eficiência da coluna para cada velocidade estudada.

Figura 25 – Eficiência na coluna 2 em função da velocidade de entrada do efluente



Fonte: Autor (2019)

Conforme verificado anteriormente, a observação do perfil se reflete na eficiência da coluna, sendo a velocidade de 1 cm/s de descarga do efluente na coluna a que possui uma maior eficiência, de 82,66%, há uma queda de rendimento de 35,4% ao aumentar a velocidade do efluente de 1 para 6 cm/s.

Essa maior velocidade prejudica o contato entre as fases, não permitindo a adesão entre as gotículas descendentes e as bolhas ascendentes, o que segundo Matiolo e Rubio (2003), um dos fatores que podem gerar essa baixa eficiência a medida que ocorre esse aumento de velocidade

pode ser pelo colapso bolha-gotícula ocasionado pelo aumento da turbulência e também da concentração de óleo na coluna.

Em Li et al. (2007) esse efeito pode ser explicado devido a diminuição do tempo de contato entre as fases, sendo assim, o aumento da velocidade do efluente na coluna diminui o tempo de contato entre as fases diminuindo a eficiência por consequência.

Pode-se visualizar, pela Figura 25, que o menor fluxo de efluente produz o melhor resultado. Porém a baixa vazão de efluente influi na viabilidade do processo, sendo a avaliação deste efeito não faz parte do escopo desse trabalho.

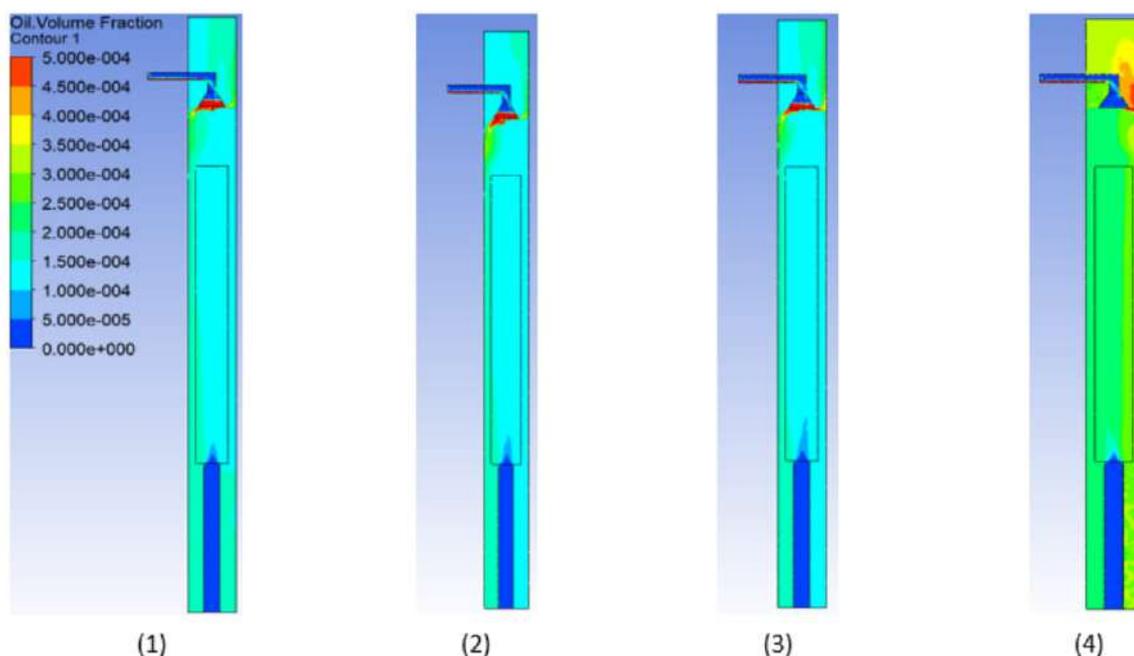
O que será avaliado é que a diminuição dessa corrente influi na probabilidade de contato entre as fases, uma sugestão pode ser o aumento da vazão de bolhas, com a ressalva dos limites observados na seção anterior.

5.4 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE REMOÇÃO DO EFLUENTE TRATADO AO FUNDO DA COLUNA

A remoção do efluente tratado ao fundo da coluna se mostra uma variável operacional importante para o estudo, já que esta pode influenciar no tempo de residência das partículas na coluna e como o processo se mostra viável tecnicamente.

Na Figura 26 é possível observar o perfil das frações volumétricas de óleo para os estados de fluxo na base da coluna.

Figura 26 – Perfil de fração volumétrica de óleo: 1 = 40%; 2 = 50%; 3 = 60% e 4 = 70%

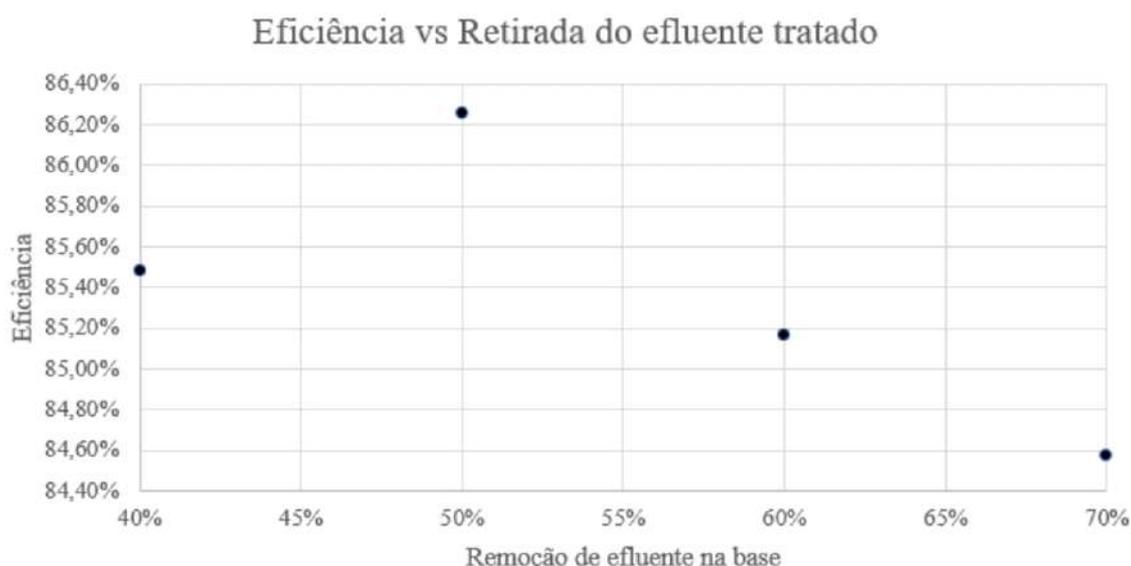


Fonte: Autor (2019)

Analisando os perfis da Figura 26, pode ser verificado uma baixa alteração visível nos três primeiros casos - (1), (2) e (3). Em (4) é apresentado um perfil mais concentrado de óleo na região da coluna, podendo assim ocorrer uma baixa separação nesse caso. Desta forma para avaliar os perfis teve que ser encontrada a eficiências em separado de cada caso estudado.

Vale a pena ressaltar que os valores atribuídos para esse estudo são relacionados em porcentagens do total do fluxo de entrada total dos fluidos da coluna, assim 40% representa 40 % da vazão de entrada de fluidos da coluna. A Figura 27 representa a eficiência da coluna pelo fluxo de remoção na coluna.

Figura 27 – Eficiência da coluna pela a remoção do efluente na base



Fonte: Autor (2019)

A Figura 27 mostra uma melhor eficiência quando a taxa de fluxo de saída do efluente na base da coluna é igual a metade do fluxo de entrada total, 50%, possuindo uma eficiência de 86,25 % de remoção de óleo. A partir desse valor há um decréscimo nesta variável de 1,26% para 60% e 1,95 % para 70 %, se comparando ao valor de rendimento para este ponto.

A eficiência da coluna está relacionada intimamente com o tempo de residência da coluna e sendo esta associada aos fluxos das fases do escoamento, pode-se influir que aumento da taxa de descarga no fundo da coluna tende a reduzir o tempo de residência e assim provocando um menor contato bolha/óleo.

Outro ponto a se argumentar, no efeito acima observado tem como base Mاتيolo e Rubio (2003), o qual se explica as influências na propriedade de probabilidade de colisão que representa como ocorre o contato entre as fases ascendentes (ar) e descendentes(óleo). Sendo essa influenciada pela hidrodinâmica da coluna, alguns fatores que atuam para o melhoramento são: Tensão de cisalhamento e momentum das partículas, sendo ambas relacionadas as velocidades destas em relação a fase contínua (água).

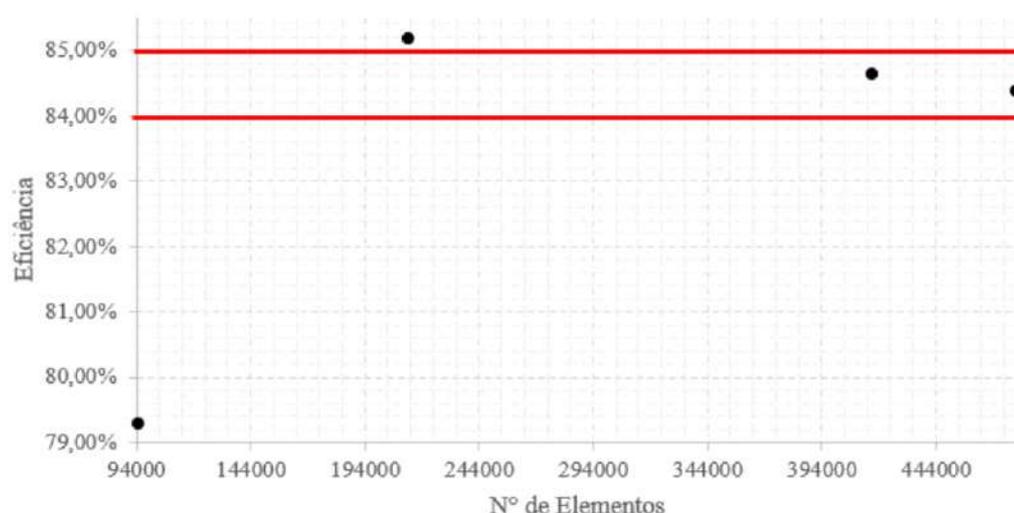
Como a fase contínua, água, tende a ser removida pela base, a velocidade das gotículas de óleo tendem a ter um fluxo que acompanha esta fase, desta forma, a probabilidade da fase óleo e da fase ar colidirem e forma uma unidade de ascensão diminui, o que é observado na Figura 27.

Vale evidenciar que esta taxa de remoção está relacionada ao fluxo de efluente tratado, assim cabe um estudo para observar a viabilidade do valor observado em um processo escalonado.

5.5 INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE ELEMENTOS DA MALHA

Nessa etapa do estudo é a observação da influência da quantidade de elementos na precisão dos resultados. As quatro malhas foram avaliadas obtendo o gráfico Eficiência x Elementos, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Resultado obtido pela simulação pelo n° de elementos da malha

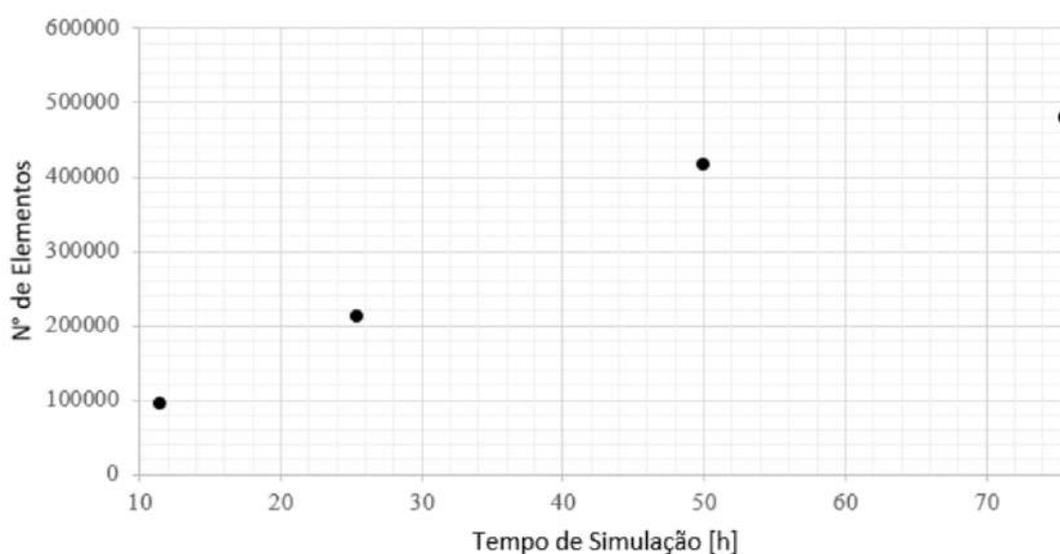


Fonte: Autor (2019)

Conforme observado na Figura 28 há uma tendência a estabilização do resultado em torno do intervalo de 84 a 85 % de remoção de óleo, observado na região marcada, o qual a medida que a malha se torna mais refinada o erro relativo entre as simulações acaba ficando irrisório, ficando abaixo dos 1% a partir de mais de 200.000 elementos.

O refinamento da malha pode trazer bons resultados ao estudo em questão, porém o elevado número de elementos pode gerar custos computacionais elevadíssimos, para a simulação descrita pode ser observada na Figura 29, uma opção de diminuir o número de elementos em uma geometria é o aproveitamento simétrico das geometrias, para o devido estudo foram aproveitadas as simetrias no axiais das colunas.

Figura 29 – Tempo computacional pelo número de elementos na malha



Fonte: Autor (2019)

Pode-se observar quase um crescimento linear do tempo necessário para a convergência da simulação pelo número de elementos. Se for comparada as Figuras 28 e 29 e observar que o tempo de processamento computacional pode ser economizado com a utilização de malhas menos refinadas, com no mínimo de 212.857 elementos, não alterando significadamente os resultados da simulação.

6 Conclusão

Com base no presente estudo, que se pode verificar que a coluna (2), alimentação ao topo em contra-corrente, apresentou melhor resultado de eficiência em comparação as demais analisadas, pois ocorreu um melhor contato entre as fases ascendentes e descendentes da coluna.

A ocorrência de recirculação interna das fases ocasionada pelo efeito *airlift* esta relacionada a eficiência de separação das fases, sendo em casos menos caóticos observa-se melhores resultados.

Ao avaliar as vazões de entrada dos fluidos, expõem-se efeitos diferentes na eficiência da coluna, assim o aumento da vazão das bolhas gera um efeito positivo.

Porém o aumento da vazão do efluente gera um efeito contrário, podendo ser explicado pelo maior contato entre as fases e diminuição do tempo de residência, respectivamente.

Ao se tratar da vazão de remoção do efluente tratado ao fundo da coluna mostrou que a melhor taxa se encontra em 50% da vazão total de entrada de fluidos na coluna, sendo esta a relação que possui melhor tempo de residência para os fluidos na coluna.

Vale ressaltar que esta variável esta relacionada ao produto final de tratamento, cabe um estudo mais detalhado para observar a viabilidade desse valor no processo.

Ao se estudar a malha da simulação pode-se verificar que a precisão desta avaliação esta dentro da aceitabilidade, pois utilizou uma relação de elementos otimizado, assim podendo realizar muitas simulações em um menor custo computacional.

6.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Validação experimental do modelo estudado;
- Avaliar a utilização de mais estágios de recirculação na eficiência de separação;
- Avaliar o uso de chicanas para aumentar o tempo de residência do óleo na coluna.

REFERÊNCIAS

- AMMAR, S. H.; AKBAR, A. S. Oilfield produced water treatment in internal-loop airlift reactor using electrocoagulation/flotation technique. **Chinese journal of chemical engineering**, Elsevier, v. 26, n. 4, p. 879–885, 2018.
- ANA. **Recursos hídricos**. 2017. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/estudo-da-agencia-nacional-de-aguas-aborda-uso-da-agua-no-setor-industrial>>.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. 1. ed. Brasília, 2018.
- ANSYS. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. 12.1. ed. Canonsburg, PA, 2009.
- ANSYS. **ANSYS Fluent Meshing User's Guide**. 15. ed. Canonsburg, PA, 2013.
- ANSYS, C. **ANSYS CFX Documentation**. Canonburg, PA: Release, 2012.
- ARAUJO, B. C. S. de; SILVA, J. M. B. da; WADA, R.; FILHO, S. R. de O. Tratamento de efluentes industriais. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 4, n. 2, 2010.
- BENNETT, G. F.; SHAMMAS, N. K. Separation of oil from wastewater by air flotation. In: **Flotation technology**. Nova York: Springer, 2010. p. 85–119.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2^o. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- BRAILE, P.; CAVALVANTI, J. **Manual de tratamento de águas residuais Industriais**. São Paulo: CETESB, 1993.
- BRASIL. **Recursos hídricos**. 2010. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/meio-ambiente/2010/11/recursos-hidricos>>.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.
- COATES, J.; PRESSBURG, B. How to analyse two-phase flow. **Chemical Engineering**, p. 153–6, 1959.
- CONAMA. **Resolução n^o 430**. 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>.
- CROWE CLAYTON T.; MICHAELIDES, E. S. J. D. **Multiphase Flow Handbook, Second Edition**. 2. ed. Nova York: CRC Press, 2016. (Mechanical and Aerospace Engineering Series). ISBN 1498701000,978-1-4987-0100-6,9781498701013,1498701019.
- DAVIDSON, P. **Turbulence: An introduction for scientists and engineers**. 1. ed. Nova York: Oxford University Press, 2004.
- E2FLOT. 2017. Disponível em: <<http://www.e2ps.com.br/equipaments/e2flot.php>>.
- EKAMBARA, K.; DHOTRE, M. Cfd simulation of bubble column. **Nuclear engineering and design**, Elsevier, v. 240, n. 5, p. 963–969, 2010.

FAKHRU'L-RAZI, A.; PENDASHTEH, A.; ABDULLAH, L. C.; BIAK, D. R. A.; MADAENI, S. S.; ABIDIN, Z. Z. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. **Journal of hazardous materials**, Elsevier, v. 170, n. 2-3, p. 530–551, 2009.

FIDELIX, T. L. da S. **TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA PARA A GERAÇÃO DE VAPOR UTILIZADO NA INJEÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO**. Dissertação (Bacharelado em Engenharia de Petróleo) — UFRN, Natal., 2017.

FONSECA, L. **Estudo das variáveis operacionais do processo de separação petróleo-água, utilizando flotação por ar dissolvido**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**. 2º. ed. São Paulo: Editora Usp, 2012.

FRANCO, A. P. M. L. C. B. M. J. Tratamento de Águas residuais em refinarias. In: 7º CONGRESSO DA ÁGUA. ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS. Lisboa, 2004.

GROPP, W. D.; KAUSHIK, D. K.; KEYES, D. E.; SMITH, B. Performance modeling and tuning of an unstructured mesh cfd application. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. **Proceedings of the 2000 ACM/IEEE conference on Supercomputing**. [S.l.], 2000. p. 34.

GU, X.; CHIANG, S.-H. A novel flotation column for oily water cleanup. **Separation and Purification Technology**, Elsevier, v. 16, n. 3, p. 193–203, 1999.

HE, D.; DING, F.; HU, H.; CHIANG, S. A multiple-loop flotation column for wastewater treatment. **Separations Technology**, Elsevier, v. 5, n. 3, p. 133–138, 1995.

INDUSTRY. **Separador Gravimétrico**. 2017. Disponível em: <<http://www.directindustry.es/prod/hy-pro-filtration/product-67731-1183289.html>>.

IRRISYST. **Filtro Hidrociclone**. 2017. Disponível em: <https://irrisyst.eu/new/khidrociklonni/140-khidrociklonen-filtr-f730-1-12.html?search_query=izrael&results=88>.

JAFARINEJAD, S. **Petroleum waste treatment and pollution control**. Londres: Butterworth-Heinemann, 2016.

JÚNIOR, J. L. da S. **Investigação do escoamento bifásico gás-liquido em uma coluna de bolhas retangular por meio da técnica CFD**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

KOSTOGLU, M.; KARAPANTSIOS, T.; MATIS, K. Cfd model for the design of large scale flotation tanks for water and wastewater treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 46, n. 20, p. 6590–6599, 2007.

LI, X.-b.; LIU, J.-t.; WANG, Y.-t.; WANG, C.-y.; ZHOU, X.-h. Separation of oil from wastewater by column flotation. **Journal of China University of Mining and Technology**, Elsevier, v. 17, n. 4, p. 546–577, 2007.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2017.

- MALISKA, C. R.; SILVA, A. F. da; REZENDE, R. V.; GEORG, I. C. Interface forces calculation for multiphase flow simulation. **EBECEM-1º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Líquido-Gás**, Florianópolis, 2008.
- MARINHO, C. dos S. **Processo De Flotação Com Recirculação Interna Aplicado À Separação Petróleo-Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.
- MATIOLO, E. d. M. E.; RUBIO, J. Flotação avançada para o tratamento e reaproveitamento de águas poluídas. **XIX PRÊMIO JOVEM CIENTISTA-ÁGUA-FONTE DA VIDA**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Porto Alegre, 2003.
- MCCLURE, D. D.; KAVANAGH, J. M.; FLETCHER, D. F.; BARTON, G. W. Development of a cfd model of bubble column bioreactors: part two—comparison of experimental data and cfd predictions. **Chemical Engineering & Technology**, Wiley Online Library, v. 37, n. 1, p. 131–140, 2014.
- MOTTA, A. R. P. d.; BORGES, C. P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K. P.; ARAUJO, P. M.; BRANCO, L. d. P. N. Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 18, n. 1, p. 15–26, 2013.
- NAGASE, H.; EGUCHI, K.; YOSHIHARA, K.-I.; HIRATA, K.; MIYAMOTO, K. Improvement of microalgal nox removal in bubble column and airlift reactors. **Journal of fermentation and bioengineering**, Elsevier, v. 86, n. 4, p. 421–423, 1998.
- NYGREN, A. **Simulation of bubbly flow in a flat bubble column**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Lund University, Lund, 2014.
- ORTIZ, J.; RIERA, A.; ZEPPIERI, S.; ROJAS-SOLORZANO, L.; DERJANI-BAYEH, S. Evaluation of interphase drag models for the determination of gas hold-up of an air-water system in a spouted bed using cfd. **Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering**, IOS Press, v. 12, n. 4-6, p. 269–281, 2012.
- PADRÓN, A. S. **study and review of the current understanding of models for the simulation of vertical turbulent bubbly flow with CFD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) — Universidad de Sevilla, Sevilla, 2012.
- POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. Mecânica dos fluidos. In: _____. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2003. cap. 15, p. 596 – 630.
- PRAKASH, R.; MAJUMDER, S. K.; SINGH, A. Flotation technique: Its mechanisms and design parameters. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, Elsevier, 2018.
- QI, W.-K.; YU, Z.-C.; LIU, Y.-Y.; LI, Y.-Y. Removal of emulsion oil from oilfield asp wastewater by internal circulation flotation and kinetic models. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 91, p. 122–129, 2013.
- RAN, J.; LIU, J.; ZHANG, C.; WANG, D.; LI, X. Experimental investigation and modeling of flotation column for treatment of oily wastewater. **International Journal of Mining Science and Technology**, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 665–668, 2013.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana simples inclinada.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

RIBEIRO, J. A. **Contribuição ao estudo experimental e em CFD da fluidodinâmica de coluna de bolhas com aplicações na separação de misturas oleosas e processamento mineral por ar dissolvido.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

RIJK, S. E. D.; BLANKEN, J. G. den et al. Bubble size in flotation thickening. **Water Research**, Elsevier, v. 28, n. 2, p. 465–473, 1994.

RODRIGUES, J.; BÉTTEGA, R. Evaluation of multiphase cfd models for dissolved air flotation (daf) process. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 539, p. 116–123, 2018.

ROSA, E. S. **Escoamento multifásico isotérmico: modelos de multifluidos e de mistura.** Porto Alegre: Bookman Editora, 2009.

RUBIO, J.; SOUZA, M.; SMITH, R. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals engineering**, Elsevier, v. 15, n. 3, p. 139–155, 2002.

SALEM-SAID, A.-H.; FAYED, H.; RAGAB, S. Numerical simulations of two-phase flow in a dorr-oliver flotation cell model. **Minerals**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 3, p. 284–303, 2013.

SÁNCHEZ-MINERO, F.; SÁNCHEZ-REYNA, G.; ANCHEYTA, J.; MARROQUIN, G. Comparison of correlations based on api gravity for predicting viscosity of crude oils. **Fuel**, Elsevier, v. 138, p. 193–199, 2014.

SCHILLER, L.; NAUMANN, A. A drag coefficient correlation. *vdi zeitung*, 77: 318–320, 1935. **Cité page**, v. 38, 1993.

SHAMMAS, N. K.; BENNETT, G. F.; WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; SELKE, W. A.; AULENBACH, D. B. **Flotation Technology: Volume 12.** 1. ed. Nova York: Humana Press, 2010. (Handbook of Environmental Engineering 12). ISBN 1588294943,9781588294944.

SHANNON, W.; BUISSON, D. Dissolved air flotation in hot water. **Water Research**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 759–765, 1980.

SHARMA, A. **Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis.** Londres: John Wiley & Sons, 2016.

SHI, F. **Removal of mixed contaminants from wastewater by multistage flotation process.** Tese (Doutorado) — University of Pittsburgh, 2006.

SILVA, M. K.; D'ÁVILA, M. A.; MORI, M. Study of the interfacial forces and turbulence models in a bubble column. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 44, p. 34–44, 2012.

SOKOLICHIN, A.; EIGENBERGER, G.; LAPIN, A. Simulation of buoyancy driven bubbly flow: established simplifications and open questions. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 50, n. 1, p. 24–45, 2004.

SOUZA, J. F. A. d.; OLIVEIRA, L. R. d.; AZEVEDO, J. L. L. d.; SOARES, I. D.; MATA, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, SciELO Brasil, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011.

THOMPSON, J. P. **Passando a Limpo: A Flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes industriais**. 1^o. ed. Jundiaí: Paco Editorial, 2015.

TOMIYAMA, A. Struggle with computational bubble dynamics. **Multiphase Science and Technology**, v. 10, n. 4, p. 369–405, 1998.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. Nova York: Butterworth-Heinemann, 2018.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT Usando Malhas Não-estruturadas**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson Education, 2007.

WANG, L.-g.; LIU, W.-j.; WANG, X.-j.; CHEN, Y.-f.; LIU, S.-q.; WANG, A.-m. Notice of retraction test of treating oily wastewater for reinjection with microfiltration equipment. In: IEEE. **Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on**. Wuhan, 2011. p. 1–4.

WANG, Y. L.; WANG, N.; JIA, R.; ZHANG, K.; LIU, B.; SONG, W.; JIA, J. Research on cfd numerical simulation and flow field characteristics of countercurrent–cocurrent dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, IWA Publishing, v. 77, n. 5, p. 1280–1292, 2018.

WILKES, J. O.; BIRMINGHAM, S. G. **Fluid Mechanics for Chemical Engineers with Microfluidics and CFD**. Boston: Pearson Education, 2006.

YU, L.; HAN, M.; HE, F. A review of treating oily wastewater. **Arabian journal of chemistry**, Elsevier, v. 10, p. S1913–S1922, 2017.

ZOUAIN, R. N. A. Engenheiro de automação: Sistemas de produção, refino e transporte de petróleo. In: PROMINP (Ed.). **SENAI**. Rio de Janeiro, 2012.