



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

ROSANGELA CRISTINE DA SILVA HENAUTH

**PRODUÇÃO DE MICROBOLHAS UTILIZANDO A
INDUÇÃO DE AR ATMOSFÉRICO PARA MELHORIAS
NO PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
(FAD)**

**RECIFE
2015**

ROSANGELA CRISTINE DA SILVA HENAUTH

**PRODUÇÃO DE MICROBOLHAS UTILIZANDO A
INDUÇÃO DE AR ATMOSFÉRICO PARA MELHORIAS
NO PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO
(FAD)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Modelagem e Otimização de Processos.

Orientador: Prof^o. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Leonie Asfora Sarubbo

RECIFE
2015

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

H493p Henauth, Rosangela Cristine da Silva

Produção de microbolhas utilizando a indução de ar atmosférico para melhorias no processo de flotação por ar dissolvido (FAD) / Rosangela Cristine da Silva Henauth; orientador Valdemir Alexandre dos Santos, 2015. 152 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-graduação. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2015.

1. Bomba centrífuga. 2. Águas residuais - Purificação. 3. Flotação. 4. Separação (Tecnologia). I. Título.

CDU 574.6

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD)

ROSANGELA CRISTINE DA SILVA HENAUTH

Comissão Examinadora

Profº. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Orientador)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Profº. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Junior
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Profº. Dr. Carlos Adolpho Magalhães Baltar
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Defendida em ____/____/____

Coordenadora: Profª. Drª. Clarissa Daisy Costa Albuquerque

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

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

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar... As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”

(Chico Xavier)

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

AGRADECIMENTOS

À Deus por mais uma oportunidade de reencarnação.

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

Ao meu professor, Orientador e amigo, o Prof^o. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, pelo apoio técnico, profissional e pessoal durante todo meu Mestrado e grande parte de minha existência.

A minha professora, Co-orientadora e amiga, a Prof^a. Dr^a. Leonie Asfora Sarubbo, pelas palavras ditas nas horas certas, seu sorriso contagiante, pelo seu “boa tarde minha linda” muito bem vindo, sem contar com o seu apoio técnico preciso.

À Coordenadora do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Prof^a. Dr^a. Clarissa Dayse da Costa Albuquerque, pelo apoio durante o curso.

Ao Reitor da UNICAP, Pe. Pedro Rubens Ferreira de Oliveira, S. J. pela oportunidade em desenvolver este trabalho nesta universidade.

Às professoras Dr^a. Alexandra Amorim Salgueiro, Dr^a. Roziana Cunha Jordão e Dr^a. Lúcia Fernanda Cavalcanti da Costa Leite pela amizade conferida e ensinamentos repassados ao longo desses anos.

A Mikele San’Anna pela ajuda e apoio técnico, conferidos ao longo do presente Mestrado, com o software CFX.

Ao técnico Francisco das Chagas Souza dos Santos (Chicó) pela paciência e ajuda conferida ao longo do Mestrado.

Ao meu amigo Alex Elton de Moura pelo conhecimento e ajuda conferidas a mim, principalmente no último ano do curso.

Aos meus colegas, do Laboratório de Bioengenharia por repassar conhecimentos sempre que possível.

A minha grande mãe e meu porto seguro Rosa Cristina da Silva Henauth e ao meu pai João de Deus Henauth Filho, que é minha fortaleza, por me receberem como filha para mais uma etapa de aprendizado no corpo físico e

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

por me fazerem uma pessoa melhor a cada dia vivendo ao lado deles me concedendo amor incondicional dia após dia.

Ao meu irmão Renato Henauth pelo carinho e amizade.

A minha irmã do coração, Edjane Henauth, pelos momentos de alegria e descontração.

Ao meu namorado Robson Vasconcelos pela compreensão, carinho, dedicação, paciência e, acima de tudo, pela oportunidade de estarmos juntos mais uma vez.

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

Aos meus tios Iara Almeida, Jacinta Lomonaco e Marcus Henauth pelas palavras de encorajamento.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI) pelo apoio técnico concedido.

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

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 MÉTODOS DE SEPARAÇÃO LÍQUIDO-LÍQUIDO	6
3.1.1 EQUIPAMENTOS TANQUES SEPARADORES GRAVITACIONAIS	7
3.1.2 EQUIPAMENTOS SEPARADORES ELETROSTÁTICOS	8
3.1.3 EQUIPAMENTOS DE HIDROCICLONES	9
3.1.4 PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA (PSM)	10
3.1.5 PROCESSO DE ADSORÇÃO	11
3.1.6 PROCESSO DE DECANTAÇÃO	11
3.1.7 EQUIPAMENTOS TRATADORES TERMOQUÍMICOS	12
3.1.8 PROCESSO DE FLOCULAÇÃO	12
3.1.9 PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO	13
3.1.10 PROCESSO DE COAGULAÇÃO	13
3.1.11 PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO	14
3.1.12 PROCESSO DE FLOTAÇÃO	14
3.1.13 PROCESSO DE ELETROFLOTAÇÃO	17
3.2 PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD)	17

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

3.2.1 PARÂMETROS RELEVANTES DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	22
3.3 PRODUÇÃO DE MICROBOLHAS	25
3.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	30
3.4.1 ETAPAS DA SIMULAÇÃO	33
4. REFERÊNCIAS	39
<u>CAPÍTULO 2</u>	<u>56</u>
1. INTRODUÇÃO	58
2. MATERIAL E MÉTODOS	60
2.1 MATERIAL	60
2.2 MÉTODOS	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4. CONCLUSÕES	66
AGRADECIMENTOS	67
REFERÊNCIAS	67
<u>CAPÍTULO 3</u>	<u>81</u>
<u>CONCLUSÕES GERAIS</u>	<u>82</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>83</u>
MICROBUBBLES GENERATION WITH AID OF A CENTRIFUGAL PUMP	84
ABSTRACT	85
1 INTRODUCTION	85
2 MATERIAL AND METHODS	87
3 RESULTS AND DISCUSSION	91
4 CONCLUSIONS	94
ACKNOWLEDGMENTS	95
REFERENCES	96
TABLE LEGENDS	110
FIGURE CAPTIONS	111
SHORT TEXT FOR THE TABLE OF CONTENTS SECTION	112
NORMAS PARA SUBMISSÃO EM PERIÓDICO INTERNACIONAL	115

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

DEPÓSITO DE PATENTE

135

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tanque Separador Gravitacional	8
Figura 2- Esquema de um Hidrociclone	10
Figura 3 - Membranas filtrantes.....	11
Figura 4 - Esquema simplificado das unidades de FAD de 1º Geração	19
Figura 5 - Esquema simplificado das unidades de FAD de 2ª Geração	19
Figura 6 - Vaso saturador ar/água de um sistema FAD	21
Figura 7 - Esquema de um bocal difusor.....	26

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

V_T = Velocidade de elevação terminal do agregado bolha/floco (cm/s)

D_{agg} = Diâmetro efetivo do agregado bolha/floco (cm)

g = Constante da aceleração gravitacional (cm/s^2)

ΔF_C = Variação da energia livre do sistema

P_{atm} = Pressão atmosférica (kPa)

P_{sat} = Pressão saturada (kPa)

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Símbolos Gregos

ρ_1 = Massa específica do agregado bolha/floco (g/cm^3)

μ = Viscosidade da fase contínua (N.s/m^2)

γ = Tensão superficial ($10^{-3}.\text{N/m}$)

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

LISTA DE ABREVIATURAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

API – *American Petroleum Institute*

TPH – Hidrocarbonetos Totais do Petróleo

TAS – Taxa de Aplicação Superficial

FAD – Flotação Por Ar Dissolvido

FAI – Flotação Por Ar Induzido

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

WRC – *Water Research Centre*

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

RESUMO

A contínua expansão da indústria de processamento de hidrocarbonetos e a extensa utilização de produtos relacionados com o petróleo aumentou a ameaça da poluição por esse tipo de produto no meio ambiente. Na indústria, em geral, há uma demanda muito grande por água de boa qualidade e grande parte do referido volume será eliminado para corpos receptores com uma alta carga de matéria orgânica e sólidos, motivo pelo qual águas residuárias geradas em todos os processos industriais devem passar por um tratamento específico. Com isso, alguns processos físico-químicos são largamente solicitados e entre eles a flotação por ar dissolvido (FAD), onde a produção de microbolhas é essencial para um eficiente tratamento do efluente contaminado. Nesta pesquisa foi proposta uma técnica inovadora para produção de microbolhas. A nova técnica induz um fluxo de ar na linha de aspiração de uma bomba centrífuga, em função da pressão negativa existente neste ponto da instalação. Como metodologia de identificação de condições de produção otimizada de microbolhas, foi aplicado um planejamento experimental do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR). Dentro das condições de trabalho foram identificadas por variáveis independentes a razão entre as vazões de ar e água (X_1) e a pressão na linha de descarga da bomba (X_2). Quando testado em um protótipo piloto de flotação por ar dissolvido (FAD), a técnica possibilitou uma eficiência de separação água/óleo da ordem de 97 %. De acordo com os resultados obtidos, a referida metodologia mostrou-se vantajosa em comparação aos processos convencionais de saturação da água a ser tratada com ar comprimido, pela redução de equipamentos e custos com energia.

Palavras-Chave: FAD; Microbolhas; Separação Água-Óleo; DCCR; Bomba Centrífuga.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

ABSTRACT

The continuous expansion of the hydrocarbon processing industry and the extensive use of petroleum-related products has increased the threat of pollution by this type of product in the environment. In the industries, in general, there is a great demand for good quality water and much of the volume of water will be eliminated for receiving bodies with a high load of organic matter and solids. Thus the wastewater generated in all industrial processes needs to have a specific treatment. Some physical-chemical processes are widely requested, including the dissolved air flotation (DAF), where the production of microbubbles is essential for an effective treatment of the contaminated effluent. In this research an innovative technique was proposed for producing microbubbles for the treatment of oily water. The new technique induces a flow of air in the suction of a centrifugal pump, depending on the negative pressure existing at this point in the installation line. A central composite rotational design was used to determine the efficiency of the method. Within the working conditions, independent variables were identified by the ratio between the air flow and water (X_1) and the pressure in the pump discharge (X_2) line. When tested in a dissolved air flotation prototype (DAF), the technique provided a separation efficiency of 97 % water/oil. According to the results obtained, the above method proved to be advantageous compared to the conventional process of saturation of the effluent treated with compressed air, by reducing the number of equipment and the energy costs.

Keywords: DAF; Microbubbles; Oil-Water Separation; CCRD; Centrifugal Pump.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

CAPÍTULO 1

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

1. INTRODUÇÃO

Dependendo da disponibilidade hídrica, além de iniciativas para a redução do consumo de água, qualquer instalação industrial está sujeita a questões ambientais e às recentes condicionantes legais de gestão de recursos associados à cobrança pelo uso da água (TESSELE et al., 2009; CNRH, 2005; CEIVAP, 2002). Por conseguinte, as plantas industriais ficam, muitas vezes, condicionadas a reusar, na medida do possível, os seus próprios efluentes, após tratamento adequado, uma vez que os referidos custos de implantação e de operação são inferiores aos associados à captação e ao tratamento de águas de mananciais ou à compra de água oferecida por empresas de saneamento, tanto de sistemas potáveis como de sistemas de água de reuso.

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 430/2011 (art. 16, I) que complementa e altera a resolução CONAMA 357/2005, informa que:

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

Por isso, alguns tratamentos para efluentes oleosos tem sido aplicados mundialmente nas indústrias objetivando o seu descarte ou o reuso da água tratada na própria indústria (GUIMARÃES, 2013).

As águas residuárias oleosas, provenientes das plataformas de petróleo, podem ocorrer nos estágios de produção, transporte, manutenção das instalações, bem como durante a utilização do próprio petróleo e seus derivados. O descarte ou até mesmo a reinjeção dessas águas oleosas só é permitido após a remoção do óleo e sólidos em suspensão em níveis aceitáveis (CONAMA, 357/2005 - art. 5).

O cisalhamento causado por bombas, válvulas, restrições hidráulicas e outros equipamentos, dispersa o óleo e a água formando emulsões, que podem apresentar-se altamente estabilizadas pela presença de sólidos

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

finamente divididos, substâncias surfactantes naturais do petróleo e outros reagentes adicionados durante o processo de produção de óleos lubrificantes e combustíveis (SARUBBO, 2012).

A contínua expansão da indústria de processamento de hidrocarbonetos e a extensa utilização de produtos relacionados com o petróleo aumentou a ameaça da poluição, por esse tipo de produto, ao meio ambiente. Três métodos são largamente usados para separar o óleo em suspensão e gorduras a partir de água e de águas residuárias: separação por gravidade (sedimentação), filtração e flotação por ar dissolvido (FAD) (CARTIER, 2005).

A flotação por ar dissolvido é a mais praticada porque o método é o mais versátil. Esse processo tem despertado grande interesse para o tratamento de efluentes líquidos, especialmente aqueles efluentes em que a diferença entre as densidades de fase é pequena (CARTIER, 2005).

A flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo alternativo para a separação sólido-líquido e líquido-líquido em que as partículas são removidas através da agregação a bolhas de ar. O processo de FAD consiste num sistema de saturação, onde a água é saturada com ar sob pressão e um tanque de flotação. Sendo este tanque dividido em zonas de contato e de separação (BEHIN; BAHRAMI, 2012). Na zona de contato, a água supersaturada é injetada no tanque de flotação através de um bocal. A redução de pressão libera o ar na solução sob a forma de microbolhas, com diâmetros variando entre 50 e 100 μm . A zona de contato de um reator de FAD é onde as partículas em suspensão se misturam com o ar, pela primeira vez, de modo a formar agregados estáveis flutuantes. A finalidade dessa zona de contato é proporcionar a colisão e adesão das partículas às bolhas, enquanto a zona de separação tem por finalidade favorecer o transporte dos aglomerados de partículas ascenderem até a superfície do tanque, produzindo, assim a espuma oleosa (MORUZZI, 2010).

Apesar de o processo FAD ter recebido uma grande atenção dos pesquisadores sobre separação água-óleo (SAO), a produção de microbolhas apresenta-se como uma etapa crítica para o processo. A utilização de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

equipamentos como compressor e tanques com pressurização para produção de efluente saturado, envolve consumos consideráveis de energia, precisam ser substituídos, dando lugar a equipamentos mais compactos e econômicos (SARUBBO et al., 2012a; 2012c).

As águas oleosas produzidas pelas instalações de uma usina geradora de eletricidade deverão passar por um tratamento adequado para reuso posterior, obedecendo à condicionante ambiental anteriormente descrita (NASCIMENTO et al., 2012a; 2012b; SARUBBO et al., 2012a; 2012c). Nesse sentido, será desenvolvido um sistema de tratamento envolvendo separação água/óleo (SAO), por meio da técnica de flotação por ar dissolvido (FAD). A água recém separada do óleo livre será levada a uma câmara onde deverá receber um fluxo de microbolhas. De acordo com a literatura, essa produção de microbolhas apresenta-se como um parâmetro relevante para uma técnica de FAD (RUBIO, 2011).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma técnica de produção de microbolhas com base na indução de determinada quantidade de ar, ao efluente, visando melhorias no processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD). A referida técnica permitirá dispensar os usos de compressor e tanque de saturação, reduzindo, assim os custos com equipamentos e energia para o referido processo.

2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar um arranjo experimental para produzir microbolhas;
- planejar experimentos empregando método do tipo DCCR (Delineamento Composto Central Rotacional) para produção de microbolhas a partir de variáveis como razão entre ar e efluente na aspiração da bomba de microbolhas e pressão na linha de injeção de microbolhas;
 - analisar os resultados com auxílio da metodologia de superfície de respostas (MSR) para definição de condições adequadas de operação e
 - propor um modelo de previsão da eficiência de separação do processo de flotação por ar dissolvido (FAD) em função das condições de obtenção das microbolhas.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Métodos de Separação Líquido-Líquido

As indústrias de mineração, metalurgia, petróleo e química geram enormes quantidades de águas residuárias geralmente poluídas por sólidos, processos químicos e compostos orgânicos, dentre outros. Durante a exploração do petróleo bruto, o refino, o abastecimento de tanques, bem como o processo de lubrificação de equipamentos deixam como saldo um volume de compostos à base de hidrocarbonetos de petróleo como contaminantes de águas. Estas águas contêm, geralmente, alta salinidade e sólidos em suspensão (argila, areia). O total de sólidos dissolvidos e de óleo pode variar entre 100 e 1000 mg.L⁻¹, ou ser ainda maior, dependendo da eficiência do processo de separação água-óleo, bem como da natureza do petróleo bruto (RODRIGUES; RUBIO, 2007). Essas águas produzidas (após tratamento) são, comumente, lançadas no meio do oceano e podem causar contaminação ambiental grave, especialmente quando atingem solos e cursos de água (SANTANDER; RODRIGUES; RUBIO, 2011).

A tecnologia para o tratamento de águas oleosas, produzidas em alto mar, geralmente nas plataformas, inclui um desgaseificador (para remover o gás natural que acompanha o óleo) e separadores de água-óleo (principalmente colunas gravitacionais) (ROSA, 2003).

A literatura apresenta diversos trabalhos visando o estudo de processos para a separação de emulsões água-óleo (CUNHA, 2007). Segundo Santander; Rodrigues; Rubio (2011) muitas técnicas são disponíveis para a separação dessas emulsões, sendo nomeadas como filtração, flotação por ar dissolvido, separação por gravidade. As vantagens e desvantagens desses processos foram amplamente discutidas por Bande; Prasad; Mishra (2008).

Para que as fontes poluidoras possam atender às normas de lançamento estabelecidas pelas leis ambientais e reduzir os impactos gerados ao ecossistema, vários métodos de tratamento de efluente estão disponíveis.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Estes métodos podem ser divididos em convencionais, com adição de produtos químicos e alternativos, como os métodos de separação líquido-líquido (THEODORO, 2010).

Óleo e água são praticamente imiscíveis em condições normais, o que facilita o seu processo de separação. A água que contém óleo residual (suspenso, emulsionado ou solubilizado) é tratada e encaminhada para um destino final (SANTANA, 2009).

A concentração máxima permitida de óleo nos efluentes está na dependência da legislação vigente de cada país. As leis que regulamentam o descarte de efluentes oleosos estão se tornando cada vez mais restritas. No Brasil, de acordo com CONAMA 357/2005, a concentração de óleo nos efluentes não deve exceder 20 mg.L^{-1} . Nos Estados Unidos, para o setor de produção de metais e máquinas (aeronave, espaçonave, equipamentos eletrônicos, 'hardware', equipamentos industriais e artilharia) o descarte de efluentes oleosos deve apresentar o máximo de 35 mg.L^{-1} por dia, porém a descarga média mensal não pode ultrapassar 17 mg.L^{-1} (CHERYAN; RAJAGOPALAN, 1998).

O tratamento da água necessita da utilização de um amplo espectro de tecnologias disponíveis. Alguns processos físico-químicos são requisitados para esse fim, que incluem: separadores gravitacionais e eletrostáticos, hidrociclones, filtração por membrana, entre outros (ZODI et al., 2013). Existem também tecnologias para tratamento de águas que são baseadas em eletroquímica e, atualmente, estas alternativas oferecem vantagens competitivas sobre outras tecnologias. Este último grupo inclui eletrocoagulação, eletroflotação e eletrofloculação (RICORDEL; DARCHEN; HADJIED, 2010).

3.1.1 Equipamentos Tanques separadores gravitacionais

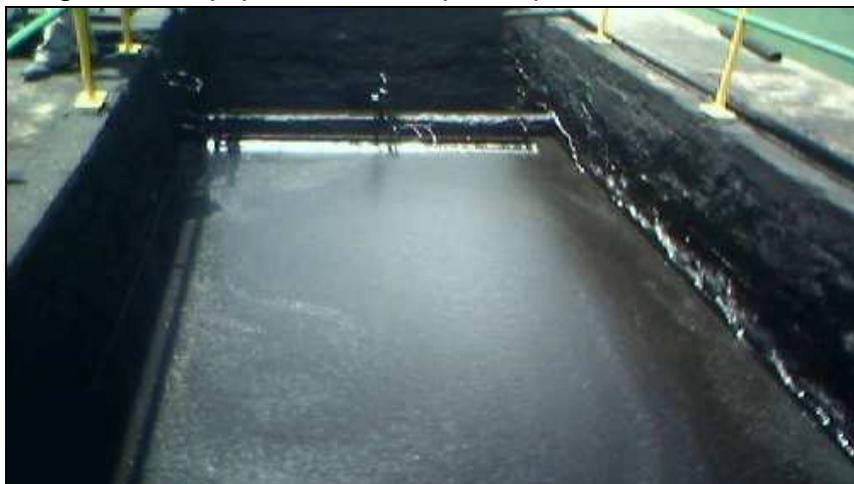
Um tanque separador gravitacional é utilizado para proporcionar uma separação da água e do óleo livre (óleo visivelmente distinto da fase aquosa).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Essa separação é usada em conjunto com pré-tratamentos químicos empregados para quebrar emulsões. O projeto de separadores de óleo por gravidade, como especificado pela API (*American Petroleum Institute*), é baseado na remoção das partículas de óleo livre com glóbulos maiores de 150 μm (SANTANA, 2009). Os tanques separadores gravitacionais possuem como desvantagem o fato de componentes solúveis de hidrocarbonetos totais do petróleo (TPH) não serem removidos com eficiência e a concentração de óleo livre pode se encontrar alta (média de 50 mg.L^{-1}) (SANTANA, 2009). A Figura 1 mostra um separador gravitacional.

O processo de separação gravitacional utiliza como princípio de separação as diferentes massas específicas associadas à imiscibilidade de diferentes componentes de uma mistura. Essa separação se dá através da sedimentação (RIBEIRO, 2012).

Figura 1 - Equipamento Tanque Separador Gravitacional



Fonte: Santana, 2009

3.1.2 Equipamentos Separadores eletrostáticos

Os separadores eletrostáticos são equipamentos que fazem uso de um campo elétrico de alta voltagem (15.000 a 50.000 Volts) aplicado a uma emulsão. Esses separadores são usados em plantas marítimas (plataformas) e,

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

também em unidades que lidam com óleo combustível residual (óleos alimentadores de caldeiras, fornos) (JUSTINO, 2010).

3.1.3 Equipamentos de Hidrociclones

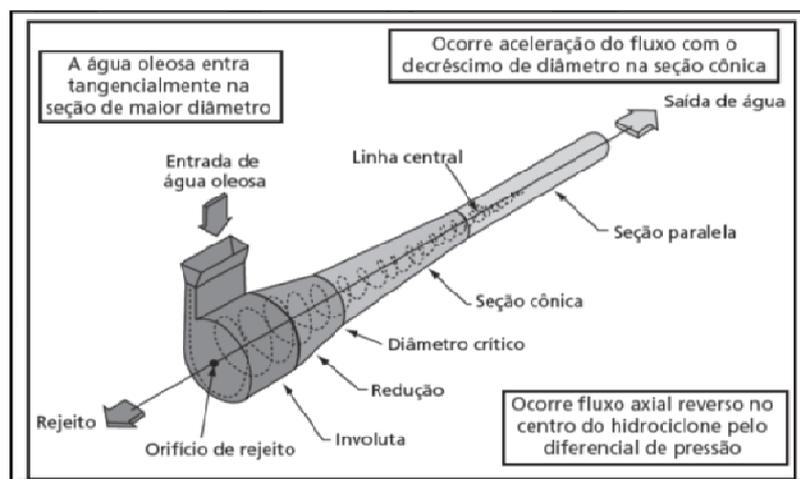
Os hidrociclones são equipamentos destinados à separação líquido-líquido, desenvolvidos para a separação água-óleo podendo ser do tipo vertical ou horizontal e, normalmente, são instalados após os separadores trifásicos ou, em alguns casos, após os separadores eletrostáticos (CÂNDIDO, 2011). A água oleosa é introduzida, sob pressão, tangencialmente no trecho de maior diâmetro do hidrociclone e direcionada internamente em fluxo espiral em direção ao trecho de menor diâmetro (JUSTINO, 2010), como mostra a Figura 2.

Os hidrociclones são equipamentos que tem um grande campo de aplicação na indústria, principalmente na petrolífera e petroquímica. Dentre suas vantagens incluem-se os fatos de serem de simples instalação, possuem baixo custo de manutenção e operacional. A característica de ser de pequeno porte é um ponto positivo para esse tipo de equipamento, visto que não apresentam partes móveis (ARRUDA, 2008).

Segundo Oliveira (2012), a principal desvantagem desse tipo de tratamento é que nos sistemas marítimos o pouco tempo de residência faz com que parte do óleo emulsionado não seja removido, conseqüentemente não atingindo os valores exigidos pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 430/2011 (art. 16, I) (Teor de Óleo e Graxa (TOG) < 20 mg.L⁻¹).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Figura 2- Esquema de um Hidrociclone



Fonte: Thomas, 2004

3.1.4 Processo de separação por membrana (PSM)

Membranas podem ser definidas como “uma barreira que separa duas fases e que restringe total, ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases”. Os PSM são usados em diversas aplicações como produção de água potável a partir da água do mar, filtração de efluentes para recuperação de compostos valiosos e para concentrar, purificar ou fracionar soluções sensíveis à temperatura (MADAENI, 1999; BAKER, 2004; MOTTA et al., 2013).

A separação por membrana é feita através de uma camada de material sintético fino e semipermeável por onde a água passa. Essa filtração por membrana pode ser de quatro tipos: Microfiltração (usada para a separação de sólidos suspensos); Ultrafiltração (requerida para separação de macromoléculas); Nanofiltração (utilizada para separar, de forma seletiva, íons multivalentes de íons univalentes) e a Osmose Reversa (aplicada para separação de componentes dissolvidos e iônicos), sendo a escolha determinada pelas características da água a ser tratada, da qualidade do efluente e da natureza da aplicação (PANIZZI, 2013; MOTTA et al., 2013). A Figura 3 exemplifica uma membrana filtrante.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Figura 3 - Membranas filtrantes



Fonte: <http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/19/artigo267599-1.aspx>

3.1.5 Processo de Adsorção

A adsorção é um processo físico-químico em que há transferência de um determinado elemento ou substância de uma fase líquida para a superfície de uma fase sólida (CRISPIM, 2009).

A adsorção baseia-se no princípio de que uma superfície sólida, em contato com um fluido, tem tendência a acumular uma camada superficial de moléculas de soluto, devido ao desequilíbrio de forças superficiais existentes. Os adsorventes mais utilizados em escala industrial são o carvão ativado, a sílica-gel, a alumina ativada (SANTOS et al., apud CAMPOS et al., 2012).

3.1.6 Processo de Decantação

A decantação, segundo Silva (2008), é um fenômeno físico que, em função da sua exposição às leis gravitacionais, permite o movimento de imersão das partículas suspensas em meio líquido, propiciando a clarificação da água.

Os decantadores são utilizados quando a separação é fácil, ou seja, além de não estarem emulsionados, os líquidos apresentam densidades

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

diferentes e as gotículas são suficientemente grandes para garantir uma velocidade de decantação razoável (PICCININI, 2013).

3.1.7 Equipamentos Tratadores Termoquímicos

Os tratadores termoquímicos separam a emulsão água/óleo por fenômenos favorecidos com o aumento da temperatura (SILVA, 2011). Esse processo de separação tem como vantagens a simplicidade, pelo fato da eliminação dos processos químicos e físicos; a necessidade de pouco pré-tratamento, onde o volume de descarte é reduzido, uma vez que os resíduos podem ser reciclados pelo evaporador. Esse tratamento termoquímico é bastante utilizado na indústria do petróleo (PANIZZI, 2013).

3.1.8 Processo de Floculação

A floculação é um processo físico-químico, caracterizada na forma como as partículas coloidais desestabilizadas são colocadas em contato umas com as outras de uma maneira tal que possa permitir a sua agregação. Nesse método de separação, procura-se a maior possibilidade de “choques” entre as partículas, tendo por finalidade a formação de agregados maiores e mais densos que sejam removidos por sedimentação ou filtração (FURLAN apud BARBOSA, 2011).

Fornari (2007) aponta a floculação como sendo a agregação dos colóides sem carga eletrostática, resultados dos choques mecânicos sucessivos causados por um processo de agitação mecânica. Um floculante é, portanto, um estimulante de coagulação que acelera a formação, a coesão e a densidade do floco e, conseqüentemente, diminui seu volume.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

3.1.9 Processo de Eletrofloculação

De acordo com Musquere; Vik (1983), a eletrofloculação, sendo um processo físico-químico, proporciona uma técnica alternativa para a remoção de poluentes das águas residuárias. O processo envolve a aplicação de uma corrente elétrica nos eletrodos de sacrifício, (alumínio ou ferro), dentro de um tanque de processamento, chamado de reator (GOBBI, 2013).

As principais vantagens do uso das tecnologias eletrolíticas são: compatibilidade ambiental, versatilidade, eficiência energética, segurança, seletividade, receptividade para automação e relação custo-benefício (MOLLAH; PARGA; COCKE, 2001) e como desvantagens: substituição, regularmente, caso sofram passivação dos eletrodos (modificação do potencial de um eletrodo no sentido de menor atividade (mais catódico ou mais nobre) devido a formação de uma película de produto de corrosão) (CRESPILHO; RESENDE, 2004).

3.1.10 Processo de Coagulação

De acordo com Fornari (2007), o processo físico-químico da coagulação é a introdução, no meio líquido, de um produto capaz de anular as cargas, geralmente, eletronegativas dos colóides presentes de forma a gerar um precipitado.

É aceito que a coagulação é provocada pela redução da carga da superfície, que é uma consequência da diminuição do potencial repulsivo da dupla camada elétrica pela presença de um eletrólito com carga oposta previamente estabilizadas por repulsão eletrostática. Apresenta como desvantagem o gasto de substâncias coagulantes, como por exemplo, sais inorgânicos de alumínio e ferro (sulfato de alumínio – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, cloreto férrico – FeCl_3 , sulfato ferroso – FeSO_4 , sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (MEYSSAMI; KASAEIAN, 2005; SCHONS, 2008; SOHAIR et al., 1980), bem como polímeros sintéticos, como poliacrilamida e óxido de polietileno, que podem ser utilizados

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

no processo, cujas dosagens variam amplamente no intuito de se atingir uma maior eficiência de remoção dos contaminantes oleosos (SCHONS, 2008).

3.1.11 Processo de Eletrocoagulação

O processo de eletrocoagulação é caracterizado como um fenômeno físico-químico, onde é possível sua obtenção com a passagem da eletricidade pela água que desestabiliza a solução e coagula os contaminantes. Estes são colocados sob fortes campos elétricos propiciando reações de oxi-redução sendo levados a estados químicos menos reativos, insolúveis e de maior estabilidade (THEODORO, 2010). A facilidade de operação, menor tempo de retenção e menor produção de lodo são pontos positivos para o processo de eletrocoagulação. Um fator negativo é o custo com energia e eletrodos (KOBYA et al., 2006).

3.1.12 Processo de Flotação

A flotação além de ser caracterizada como um fenômeno físico-químico é, também, uma técnica que desperta interesse no tratamento de efluentes industriais, principalmente os oleosos, é a flotação (CRESPILHO; RESENDE, 2004; GAO et al., 2005; GE et al., 2004). Segundo Santos et al. (2007), essa técnica tem sido bastante empregada na indústria de petróleo, no sentido de reduzir o teor de óleos e graxas em suspensão na água produzida (em torno de 4 mg.L^{-1}), quando o destino final dessa água é a reinjeção, principalmente, através da flotação por ar dissolvido (FAD) e da flotação por ar induzido (FAI). A flotação consiste em quatro passos básicos: geração de bolhas na água oleosa; contato entre as bolhas de gás e as gotas de óleo suspensas na água; união das gotas de óleo às bolhas de gás; elevação da combinação ar/óleo até a superfície onde o óleo é removido.

Várias técnicas de separação água/óleo foram propostas por décadas. As técnicas mais comuns, do ponto de vista econômico, são as que envolvem o processo de flotação. As primeiras aplicações da flotação, fora da área de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

processamento de minérios, parece ter sido por volta de 1920 na indústria de papel e celulose, com a finalidade de recuperação das fibras de madeira, resultando na diminuição da carga poluidora do efluente (ZABEL, 1985; REALI; SANTOS, 1996)

Mais recentemente, a flotação tem sido empregada também com bastante sucesso na clarificação de águas para abastecimento, em substituição aos decantadores, apresentando bom desempenho como processo de separação de fases (CAMPOS et al., 1996).

A flotação tem merecido a atenção de diversos pesquisadores de área de saneamento, os quais vêm desenvolvendo investigações a respeito dos diversos parâmetros que influem no processo, além de novas aplicações para o mesmo. Dentre tais estudiosos, pode-se citar: ZABEL (1985); REALI ; CAMPOS apud CAMPOS et al. (1996).

A referida técnica, segundo Tessele et al. (2005) fundamenta-se no processo de separação de partículas (ou agregados) via adesão a bolhas de ar, pela incorporação dessas no interior de flocos ou por simples arraste hidráulico. As unidades formadas (flocos) por bolhas e partículas (gotículas) apresentam uma densidade aparente menor do que no meio aquoso e “flutuam” ou “flotam” até a superfície do reator (célula de flotação) ou interface líquido/ar, onde são removidos.

A flotação em espuma, ou simplesmente flotação, assim caracterizada por Greet et al. (2004) é empregada de forma convencional, para o beneficiamento de minérios e tem provado sua eficiência em diversas áreas, principalmente no tratamento de efluentes industriais.

A formação do agregado estável bolha-partícula é considerada a etapa controladora da velocidade de flotação. Para sua efetivação é necessário, em primeiro lugar, que as trajetórias da partícula e da bolha permitam uma aproximação até uma distância mútua muito pequena. Sendo a bolha, em geral, de dimensões bem maiores, o estágio inicial de colisão assemelha-se à situação de uma partícula aproximando-se de uma interface plana. A elasticidade da superfície da bolha permite a formação de uma depressão no

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

momento do choque. Philippoff (1952); Evans (1954) desenvolveram uma teoria para calcular o tempo de contato ou indução, admitindo que a bolha absorva a energia cinética da partícula ao formar-se a depressão.

Esta energia cinética é transformada em energia potencial. Ao retomar sua forma esférica original, a bolha poderá, em determinadas circunstâncias, atirar a partícula de volta à polpa. A eficiência das colisões é decorrente ainda da turbulência e da hidrodinâmica do sistema mecânico. A importância dos aspectos hidrodinâmicos foi abordada posteriormente por Ityokumbul et al., (2000), em estudo de células de coluna com agitação. Uma importante contribuição envolvendo aspectos teóricos e experimentais foi também apresentada por Rodrigues; Leal Filho; Masini (2001). Para haver flotação é necessário ainda que, durante o tempo de indução, ocorra o adelgaçamento, ou seja, o estreitamento e a ruptura do filme líquido que separa a partícula da bolha (OLIVEIRA apud FERNANDES et al., 2010).

O estágio final da etapa de coleta no processo de flotação é representado pela expansão do menisco de contato formado no ponto de ruptura do filme, permitindo o estabelecimento de um ângulo de contato elevado e estável entre a partícula e a bolha. Ou seja, tem-se a formação de uma linha de contato envolvendo as três interfaces: sólido-líquido, líquido-gás e sólido-gás (OLIVEIRA apud FERNANDES et al., 2010).

Estes conceitos básicos sobre os mecanismos envolvidos no processo têm sido aceitos nas últimas décadas. No período de um século, observou-se um desenvolvimento contínuo da tecnologia de flotação, decorrente de investimentos em pesquisa, principalmente por volta de 1960 e 1970. Como consequência, nos últimos trinta anos, as aplicações do processo de flotação se multiplicaram. No Brasil, a flotação desempenhou um papel fundamental para o crescimento da indústria mineral, principalmente para as indústrias de fosfato e minério de ferro (OLIVEIRA, 2007).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

3.1.13 Processo de Eletroflotação

A eletroflotação é um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás (O_2 , H_2 , Cl). Essas bolhas são produzidas através da eletrólise da água, na base de um reator eletroquímico (CAMBOIM, 2010).

A tecnologia da eletroflotação é efetiva na remoção de partículas coloidais, óleos, graxas e poluentes orgânicos. As bolhas de gás formadas na superfície do eletrodo fazem contato com as gotas de óleo, estas são adsorvidas e transportadas para a superfície, onde ocorre a remoção (CHEN, 2004; LEITE et al., 2007).

A indústria petrolífera apresenta grandes volumes de efluentes com pequenas concentrações de óleo, formando emulsões estáveis de água/óleo (HOSNY, 1996).

Esse método de separação tem despertado bastante interesse devido às suas unidades serem pequenas e compactas e requererem pouca manutenção. Apresenta como desvantagem o alto custo com eletrodos (RODRIGUES, 2008; GOMES, 2009; CAMPOS et al., 2012).

3.2 Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD)

O processo de flotação por ar dissolvido (FAD) refere-se à flotação realizada na presença de um gás, como fonte geradora de bolhas. Na prática, qualquer gás pode ser usado, mas devido ao custo, o ar é comumente empregado na maioria das aplicações industriais. Assim, a flotação por gás dissolvido é denominada mais especificamente como flotação por ar dissolvido (FAD) (RODRIGUES, 2004).

A técnica FAD é definida por Hui et al. (2012), como um processo de separação sólido-líquido baseado na diferença de densidade, que ganhou ampla aceitação na indústria de tratamento de água potável desde a década de 70. O processo de flotação por ar dissolvido (FAD) constitui técnica eficiente em termos de separação líquido-líquido e, viável economicamente. Para

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

separar as fases, água e óleo, diversas indústrias se utilizam do sistema de FAD, como por exemplo, a petroquímica, a alimentícia, a de tintas, a de papel e celulose, entre muitas outras. Assim, um grande número de aplicações dessa técnica, em tratamentos de efluentes líquidos, já se encontra consagrado (REALI; MARCHETTO, 1996).

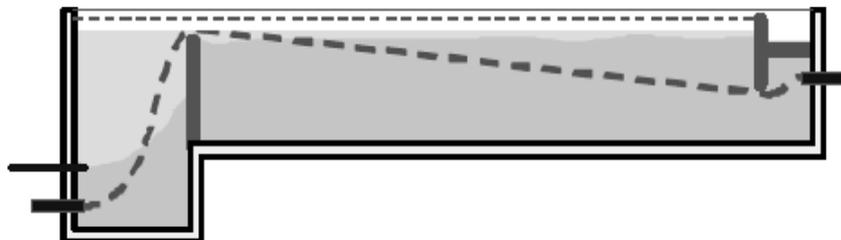
Kiuru; Rubio et al. apud Azevedo (2013), reportaram a evolução da tecnologia FAD a partir da primeira geração de equipamentos, chamada de sistema Sveen-Pedersen de flotação, até a terceira geração, FAD em condições turbulentas. As células de flotação Sveen-Pedersen, desenvolvidas na década de 1920, eram rasas, estreitas e longas, com uma taxa de aplicação hidráulica da ordem de $2 - 3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, atingindo, raramente, valores próximos a $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. A eficiência desse sistema nesta aplicação é expressa como a taxa de recuperação de partículas da água ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) (KIURU, 2000). Nesse caso, a qualidade final do efluente não tem grande importância uma vez que o foco se dá na recuperação das partículas para a reutilização industrial. Para o tratamento de água, a qualidade final do efluente produzido tem muita importância (PIOLTINE; REALI, 2011).

As primeiras unidades de FAD foram criadas por volta de 1920 e dimensionadas seguindo critérios de projetos utilizados na indústria têxtil e de papel e celulose (MORUZZI, 2005). Desde então, essas unidades sofreram profundas mudanças na sua concepção. As primeiras unidades foram chamadas de 1ª geração de FAD e tinham em comum, com as da atualidade, duas regiões distintas (KIURU, 2000, 2001; MORUZZI, 2005). São elas: (1) a zona de reação, onde o contato entre as microbolhas e flocos é promovido e; (2) a zona de flotação, onde o conjunto bolhas/flocos é conduzido a superfície para ser removido. Neste último, a direção do fluxo declina ligeiramente em relação à horizontal em função das condições de saída (Figura 4). Esse tipo de sistema ainda pode ser encontrado em uso em algumas indústrias de papel e celulose (PATRIZZI, 2002). Azevedo (2013) relata ainda que nesses equipamentos, a nuvem de microbolhas é extremamente fina e compreendida

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

entre a camada de lodo flotado e a água clarificada, que flui numa direção quase horizontal.

Figura 4 - Esquema simplificado das unidades de FAD de 1º Geração

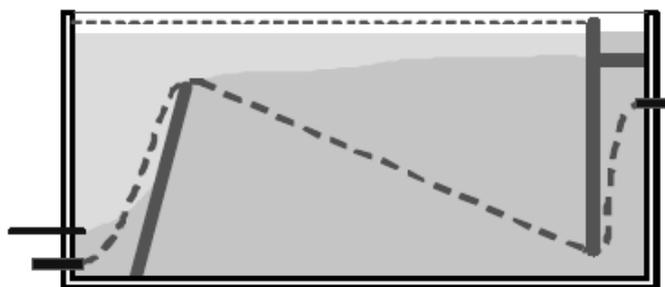


Fonte: PATRIZZI (2002) adaptado de KIURU (2000)

A segunda geração da FAD foi introduzida na década de 60, caracterizando-se por tanques mais profundos, tendo assim uma taxa de aplicação um pouco maior, chegando a valores de até 7 m. h^{-1} seguindo a tendência de aumento de taxa de aplicação e redução de área ocupada. Estas unidades são largamente empregadas ainda hoje, conforme Kiuru (2000).

Para que os valores de Taxa de Aplicação Superficial (TAS) pudessem ser alcançados, os tanques de flotação por ar dissolvido tornaram-se mais largos, mais profundos e com menor comprimento. Esse tipo de sistema é denominado de 2ª geração ou convencional. A Figura 5 mostra o esquema simplificado das unidades de flotação dessa geração (MORUZZI, 2005).

Figura 5 - Esquema simplificado das unidades de FAD de 2ª Geração



Fonte: PATRIZZI (2002) adaptado de KIURU (2000)

No Brasil, Reali (1984) realizou a primeira aplicação da FAD como etapa no tratamento de águas de abastecimento, através de pesquisa desenvolvida

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

em escala piloto de grande porte. A instalação com escoamento contínuo (6 m³/h) foi construída na Estação de Tratamento de Água de São de Carlos - SP (ETA São Carlos) onde foi utilizada a água bruta afluyente para a alimentação do reator. O autor concluiu que a FAD pode se constituir em alternativa vantajosa em relação à sedimentação, por exemplo.

Na Universidade de Massachusetts, desde 1984, Edzwald et al. (2001) têm realizado pesquisas sobre aplicação da FAD no tratamento de águas de abastecimento. Os autores citam algumas vantagens: baixo custo devido às unidades de FAD ocuparem menores áreas que a sedimentação; menores quantidades de coagulantes que as necessárias para sedimentação e, como desvantagens: custos mais altos com energia elétrica para recalque de água de recirculação. Contudo, segundo estes mesmos autores, esses custos podem ser compensados com gastos menores de produtos químicos, no tratamento e na disposição de lodo.

A terceira geração de equipamentos surgiu na década de 90. Nessa geração a profundidade do tanque é bem maior que seu comprimento e largura (KIURU, 2000).

No processo FAD, a saturação ocorre normalmente em vasos saturadores (Figura 6) ou tubulações pressurizadas, a pressões entre 4 e 6 atm (ROSA; RUBIO, 2005). Parte da água tratada é recirculada no sistema de tratamento e saturada com estas altas pressões (AZEVEDO, 2013).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Figura 6 - Vaso saturador ar/água de um sistema FAD



Fonte: Azevedo, 2013

Segundo Fernandes et al. (2010), a utilização do processo de FAD na recuperação de um corpo de água apresenta alta eficiência na remoção dos sólidos em função da elevada cinética de separação.

A primeira conferência internacional sobre FAD aconteceu em 1976 no Reino Unido. Nessa época, apenas a Escandinava possuía unidades em operação para tratamento de águas de abastecimento. Segundo Schofield (2001), já existiam mais de 16 unidades em operação para tratamento de água que serviram de referência para as discussões e propostas apresentadas.

De acordo com Schofield (2001), somente na década de 90 foram colocados em prática estudos visando à otimização dos parâmetros de projeto e o melhor conhecimento das variáveis que governam o processo de flotação por ar dissolvido.

Em 1993, o *Water Research Commission* da África do Sul citado por Haarhoff; Van Vuuren (1995), produziu um importante documento baseado na experiência prática. Esta publicação foi considerada uma das primeiras que apresentou parâmetros de projeto para unidades de FAD aplicadas ao tratamento de água visando abastecimento. Desde então, as células de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

flotação por ar dissolvido sofreram profundas mudanças advindas do melhor conhecimento do processo.

Existem centenas de unidades operando em todo mundo. São mais de 90 unidades tratando água no Reino Unido, 37 plantas na Finlândia, 26 na Austrália, 26 na África do Sul, 20 nos Estados Unidos, 15 na Suécia, 7 na França, 6 no Canadá, 5 na Noruega, 5 na Holanda, 3 na Bélgica e 1 na Nova Zelândia, conforme Schofield apud Moruzzi (2005). No Brasil existem cerca de 20 unidades operando (RICHTER; GROSS, 2000).

Na Europa, as primeiras experiências para a aplicação da flotação por ar dissolvido no tratamento de águas pluviais, com objetivo de remover a poluição de áreas urbanas, foram realizadas na cidade de Paris em 1993 por Bernard, Herviou; Poujol (1995) e em 1997 por Lainé et al. (1998), cujos resultados mostraram-se bastante satisfatórios, para a remoção de matéria orgânica, sólidos em suspensão, fósforo, metais pesados e hidrocarbonetos.

3.2.1 Parâmetros relevantes da flotação por ar dissolvido

Muitos trabalhos descritos na literatura, como os de Edzwald, (1995); Edzwald et al. (2001); Hall et al. (1995); Rubio; Carimissi; Rosa, (2007), por exemplo, demonstraram que a FAD é eficiente na clarificação de águas com turbidez baixa e alto níveis de cor, remoção de algas e protozoários *Giardia* e *Cryptosporidium*.

Várias pesquisas apontam as seguintes vantagens da técnica FAD no tratamento de águas quando comparadas a outras técnicas de separação líquido-líquido (HYDE, 1975; PACKHAM; RICHARDS, 1975; MELBOURNE; ZABEL, 1976; REES; RODMAN; ZABEL, 1979; REALI; MARCHETTO, 2001; SCHOFIELD, 2001; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002a; RODRIGUES; RUBIO, 2007; EDZWALD, 2010):

- O lodo produzido contém alto teor de sólidos, dispensando unidades adicionais de espessamento de lodo (REALI, 1991; REALI; MARCHETTO, 2001);

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

- constitui um processo de alta taxa ($> 10 \text{ m.h}^{-1}$) e requer menores tempos de floculação, resultando em unidades compactas (ZABEL, 1985; REALI; MARCHETTO, 2001);
- requer uma dosagem menor de reagentes em comparação com a sedimentação (MOUCHET, 1983; REALI; MARCHETTO, 2001);
- as microbolhas podem remover parte das substâncias voláteis, ocasionalmente, presentes na água a ser tratada (REALI, 1991; REALI; MARCHETTO, 2001; COSTA, 2003);
- remoção de sólidos suspensos, particularmente dos sólidos finos (80 – 90%) (SCHOFIELD, 2001);
- remoção de algas (50 – 80 %) com altas cargas hidráulicas (SCHOFIELD, 2001; EDZWALD, 2010);
- rápido “*start-up*” e capacidade de suportar paradas periódicas (SCHOFIELD, 2001);
- variações hidráulicas e de qualidade da água bruta, produzindo água clarificada de alta qualidade química e estética (SCHOFIELD, 2001; EDZWALD, 2010).

A otimização do processo de flotação por ar dissolvido necessita de alguns conhecimentos dos fenômenos físico-químicos interfaciais, como definidos por Baltar (2008), como a adesão, a colisão e o transporte.

Com o desenvolvimento das pesquisas, os parâmetros para o processo de flotação por ar dissolvido vêm sendo consolidados, tornando esse processo ambientalmente confiável e técnico-economicamente viável, se comparado com outras alternativas de separação de sólidos e líquidos e, empregado em vários campos do tratamento de águas e de efluentes em todo o mundo. Os princípios básicos de funcionamento do processo de flotação por ar dissolvido, são, de certa forma, simples, contudo requerem uma cuidadosa atenção com relação ao controle dos parâmetros de projeto. Esses são determinados em função das características do efluente a ser tratado (COUTINHO, 2007).

Ainda segundo Coutinho (2007), vários aspectos podem se destacar dentre esses parâmetros, como, por exemplo, tamanho das bolhas, taxa de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

aplicação superficial de flotação, tempo de floculação, taxa de recirculação do líquido pressurizado com o ar, pressão na câmara de saturação e, conseqüentemente, a quantidade de ar fornecida em relação à massa de sólidos em suspensão no líquido. Se quantidades menores do que a quantidade ótima de ar forem utilizadas no sistema de flotação a ar, a eficiência de remoção dos sólidos (ou óleo) será reduzida. Se, entretanto, muito ar for usado, haverá necessidade de um gasto excessivo de potência para comprimir essa quantidade maior de ar, sem que o retorno seja uma maior eficácia na formação de microbolhas. De qualquer maneira, como as bolhas de gás e a fase dispersa interagem, o resultado dessa interação é uma redução na gravidade específica da fase dispersa (ar/aglomerado partícula) e um correspondente aumento da velocidade de flotação. Essa velocidade de flotação é expressa na forma da lei de *Stokes*, conforme a equação 1 (SANTANA, 2009).

$$V_t = \frac{g \cdot D_{agg}^2 \cdot (\rho_1 - \rho_{agg})}{10\mu} \quad (1)$$

Em que:

V_t = Velocidade de elevação terminal do agregado bolha/floco (cm/s);

D_{agg} = Diâmetro efetivo do agregado bolha/floco (cm);

ρ_1 = Densidade da fase contínua (água; g/cm³);

ρ_{agg} = Massa específica do agregado bolha/floco (g/cm³);

μ = Viscosidade da fase contínua (c_p);

g = Constante de aceleração gravitacional (980 cm/s²).

Outro fator importante no processo FAD é a adequada geração de microbolhas que influenciará na eficiência de remoção das partículas em suspensão. Portanto, alguns elementos devem ser levados em consideração como o tipo da câmara de saturação adotado, a pressão de operação, a vazão

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

de recirculação, temperatura da água e as características do bocal adotado para despressurização da água saturada (MAIA, 2010).

Ainda de acordo com Maia (2010), o correto controle desses parâmetros durante a operação torna a FAD um método eficaz com grande potencial ao processo de clarificação.

3.3 Produção de Microbolhas

Um fator de extrema importância no processo FAD é a forma de geração de microbolhas, uma vez que são elas as responsáveis pela captura e arraste dos flocos da suspensão líquida até a superfície, onde ocorre a remoção do lodo. O método de geração de microbolhas mais utilizado é a cavitação causada pela queda de pressão, em um constritor de fluxo na entrada da célula (válvula agulha, venturi, placas de orifícios). A geometria e as condições de operação do orifício de entrada influenciam diretamente no tamanho das bolha (EDZWALD, 2010).

Para a produção das microbolhas utilizadas no processo de flotação por ar dissolvido - FAD, inicialmente satura-se a água com o ar à alta pressão na câmara de saturação e então a transfere através de um bocal redutor de pressão para a câmara de flotação onde o ar inicialmente saturado no meio líquido aparece na forma de microbolhas (LEPPINEN; DALZIEL, 2004).

O termo "microbolhas" não tem uma definição consensual Xu et al., (2009) as definem, simplesmente, como "bolhas com um diâmetro de várias dezenas de micrômetros", enquanto Shen; Longo; Powell (2008) falam de "esferas ocas individuais de menos de 200 μm de diâmetro, com um núcleo de gás revestido com uma casca fina", Tchuenbou-Magaia; Cox (2011) caracterizam como "pequenas bolhas de 0,1 a 200 μm ".

Um fator importante no processo de formação das microbolhas é o mecanismo de despressurização. Com relação a este dispositivo, que regula o controle da pressão, Pioltine (2009) analisou alguns tipos de mecanismos de

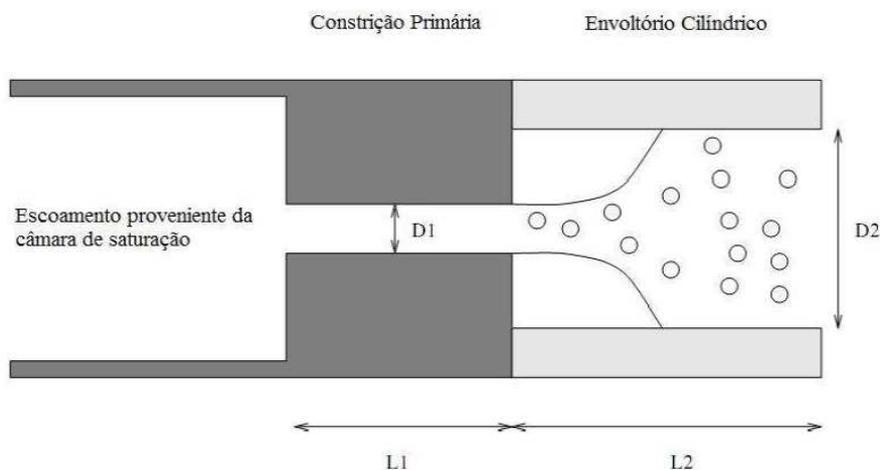
HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

liberação da recirculação tais como válvulas agulha e bocais que influenciam diretamente no tamanho das microbolhas.

Zabel apud Pioltine (2009) analisou dois diferentes tipos de dispositivos de liberação de recirculação, sendo um deles constituído de um bocal patenteado pelo *Water Research Centre* (WRC), Inglaterra, e outro, constituído de uma válvula agulha, verificando, assim, a influência do tipo de bocal difusor no tamanho das microbolhas.

Zhang; Leppinen; Dalziel (2007) desenvolveram um estudo para projeto de um bocal ideal para a FAD. Os ensaios foram realizados com a utilização de um bocal constituído por uma região de constrição primária (D_1 , L_1) e por um envoltório cilíndrico (D_2 , L_2), como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema de um bocal difusor



Fonte: Pioltine, 2009 (Adaptado: Zhang; Leppinen; Dalziel, 2007)

A água saturada é forçada através da constrição primária, aumentando sua velocidade e reduzindo sua pressão (efeito Bernoulli), o que proporciona a formação de nanobolhas. Já o envoltório cilíndrico confina o jato borbulhante, controlando a taxa de coalescência entre as bolhas e, conseqüentemente, a distribuição de seu tamanho (ZHANG; LEPPINEN; DALZIEL, 2007).

Zabel apud Pioltine (2009) diz que o ar deve ser liberado próximo ao ponto onde a vazão de recirculação é misturada com a água flocculada a fim de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

minimizar a quantidade das bolhas resultantes da coalescência (perda se área superficial). Para atingir uma efetiva liberação do ar dissolvido, a pressão deve ser reduzida de forma rápida e o dispositivo estar sob condições de alta turbulência. Contudo, a velocidade do fluxo de água recirculada que deixa o mecanismo de liberação de ar deve ser baixa o suficiente para evitar a quebra dos flocos.

A distribuição do tamanho das bolhas geradas numa unidade de FAD depende fundamentalmente da taxa de aglutinação das microbolhas. A esse respeito, Reali (1991) comenta que o fenômeno da coalescência depende da taxa de colisão entre as bolhas, além das características de suas superfícies e do líquido em torno das mesmas (tensão superficial do líquido, rigidez das paredes das bolhas e dupla camada), relatando que, para obtenção das melhores eficiências, a faixa usual para o tamanho de microbolhas é de 10 a 120 μm , estabelecendo um diâmetro médio das bolhas de 40 a 60 μm .

O uso das microbolhas proporciona diversas vantagens aos processos nos quais são empregadas (flotação, *air stripping*), tais como elevados valores de área interfacial gás-líquido que possibilitam um aumento na transferência de massa e cinética dos processos (COSTA, 2003; JAUREGI; VARLEY, 1999).

A cavitação consiste na criação e crescimento de buracos (*holes*), espaços ocupados por uma fase gasosa/vapor em um líquido, sendo a primeira etapa da cavitação (criação ou nascimento de cavidades) definida como nucleação (RUCKENSTEIN; DJIKAEV, 2005; ZHOU; ZHENGHE XU; FINCH, 1994). Usualmente, pressões entre 304 e 507 kPa são utilizadas para gerar uma quantidade suficiente de bolhas pequenas (< 100 μm) na célula de flotação.

De acordo com Zhou; Zhenghe xu; Finch (1994), estes níveis de pressão são duas ordens de magnitude menores que as pressões de supersaturação requeridas teoricamente para a nucleação espontânea de bolhas no seio (*bulk*) do líquido, implicando que a cavitação deva ser iniciada por outros processos distintos daqueles referentes às simples mudanças de pressão e difusão gás-líquido. Núcleos gasosos (cavidades) e pequenas bolhas podem ser gerados,

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

de acordo com os princípios da cavitação, por um forte cisalhamento (ou alta turbulência) e altas velocidades de fluido (fenômenos que ocorrem em constritores de fluxo na FAD), os quais criam flutuações de pressão no seio do líquido necessárias para que a pressão local diminua até o valor da pressão de vapor d'água (ZHOU; ZHENGHE XU; FINCH, 1994). Ainda, de acordo com Zhou; Zhenghe xu; Finch, (1994), um alto conteúdo de gás dissolvido, a presença de partículas sólidas no líquido e a rugosidade superficial das partículas e das paredes do recipiente facilitam a criação das cavidades.

Um número relativamente pequeno de publicações na literatura relata estudos fundamentais da formação de bolhas na FAD (DUPRE; PONASSE; SECQ, 1998; JACKSON, 1994; TAKAHASHI; MIYAHARA; MOCHIZUKI, 1979). Desta forma, os mecanismos atuantes na formação de microbolhas na FAD não são ainda bem compreendidos (DUPRE; PONASSE; SECQ, 1998). A partir de um modelo teórico (termodinâmico) para a formação de bolhas na flotação por ar dissolvido, Takahashi; Miyahara; Mochizuki (1979) deduziram que o diâmetro de uma bolha formada a partir de um líquido supersaturado com ar é inversamente proporcional à diferença de pressão utilizada para supersaturação (pressão de saturação menos a pressão atmosférica). Desta forma, teoricamente, quanto maior a pressão de saturação (P_{sat}) utilizada, menor será o tamanho (d_b) da bolha de ar formada. No entanto, Rodrigues; Rubio (2003) demonstraram experimentalmente, utilizando a técnica LTM-BSizer de determinação da DTB (Distribuição do Tamanho de Bolhas), não haver diferença significativa no diâmetro médio de Sauter (d_{32}) de populações de bolhas geradas por despressurização de água saturada (FAD) em diferentes pressões (P_{sat} entre 300 e 600 kPa) (ENGLERT, 2008). De acordo com o modelo proposto por Takahashi, Miyahara; Mochizuki (1979), a máxima mudança de energia livre do sistema (ΔF_C) que acompanha a formação de uma bolha de ar é dada pela Equação 2:

$$\Delta F_C = \frac{16\pi\gamma^3}{3 \cdot (P_{Sat} - P_{Atm})^2} \quad (2)$$

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Em que:

ΔF_C = Variação da energia livre do sistema;

P_{atm} = Pressão atmosférica (kPa);

P_{Sat} = Corresponde a pressão de saturação (kPa);

γ = Tensão superficial (10^{-3} N/m).

De acordo com a Equação 2, a formação de uma bolha a partir de um líquido supersaturado com ar é facilitada com um aumento da pressão de saturação (P_{sat}) utilizada (TAKAHASHI; MIYAHARA; MOCHIZUKI, 1979). Baseando-se na Equação 2, estes autores demonstraram a viabilidade da FAD em baixas pressões de saturação (203 - 304 kPa) via diminuição da tensão superficial (γ) do meio líquido (adição de pequenas quantidades de tensoativos). A nucleação de bolhas gasosas a partir de soluções supersaturadas não tem sido extensivamente estudada, ocorrendo frequentemente discordâncias entre dados obtidos experimentalmente e aqueles previstos pela correspondente teoria (LUBETKIN, 2003).

De acordo com Dupre; Ponasse; Secq (1998), a eficiência da formação de microbolhas na FAD é dependente do tipo de constrição de fluxo (*nozzle*) utilizada, sendo válvulas-agulha ou placas de orifício comumente empregadas. Entretanto, segundo os autores, estes últimos tipos de *nozzles* geralmente não ocasionam exclusivamente a formação de bolhas entre 10 μm e 120 μm (aproximadamente) durante a despressurização da água saturada, mas também a formação (em menor número) de bolhas maiores que 500 μm .

A distribuição de tamanho de microbolhas de ar geradas numa unidade FAD, depende fundamentalmente da taxa de aglutinação. Esta possui a influência de diversos outros fatores, como a pressão no interior da câmara de saturação, temperatura do líquido, pH da suspensão, concentração de agentes tensoativos e tipo de bocal difusor (EDZWALD, 1995).

O fenômeno da aglutinação depende da taxa de colisão entre as bolhas, das características das superfícies destas e do líquido em torno das mesmas (REALI, 1991).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Medições realizadas com o objetivo de determinar os tamanhos de bolhas na FAD indicaram que estas se encontram na faixa de 10 a 100 μm (De RIJK et al. 1994), sendo que uma razoável estimativa do diâmetro médio das bolhas é de 40 μm . Leppinen; Dalziel (2004) estudaram a distribuição dos tamanhos de bolhas geradas pela FAD dentro dos tanques de flotação de duas estações de tratamento de água.

Através deste estudo foi possível analisar a ação dos “clusters” (aglomerado de bolhas), os quais agem como filtros, constituindo o meio primário de remoção de flocos. Os ensaios indicaram tamanhos de bolhas na faixa de 16 a 350 μm (ENGLERT, 2008).

Os “clusters” são promovidos pelas menores bolhas geradas, as quais possuem velocidade de ascensão menor que as maiores bolhas (PIOLTINE, 2009). Com a formação dos “clusters”, que adquirem altas velocidades de ascensão, sendo capazes de dominar o escoamento e as flutuações turbulentas e assim, ascender à camada de lodo. As maiores bolhas (> 200 μm) são excluídas dos “clusters”, devido à presença de uma velocidade de cisalhamento que promove uma força hidrodinâmica, a qual age em todas as bolhas, causando a sua separação dos aglomerados (MAIA, 2010).

3.4 Fluidodinâmica Computacional

Pode-se definir a sigla CFD (*Computational Fluid Dynamics*) como um conjunto de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para o estudo preditivo (qualitativo e quantitativo) de fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos. Para que esse escoamento possa ser representado numericamente através de uma simulação computacional, o usuário deve fornecer informações do tipo (MALISKA, 2004):

- Geometria: forma e tamanho do domínio, entradas e saídas de massa do sistema, presença de obstáculos;
- propriedades dos fluidos: temperatura, densidade, viscosidade, condutividade térmica;

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

- condições iniciais (muito importante para um fenômeno dependente do tempo);
- condições de contorno (essencial para a resolução das equações que regem a fluidodinâmica computacional – o usuário deve fornecer as especificações de entrada e saída de massa, momento e energia em uma simulação).

A fluidodinâmica computacional, segundo Versteeg; Malalasekera (1995); Ramirez (2009); Sant'anna (2012) é uma análise de sistemas envolvendo o escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados.

O uso do CFD tem-se difundido em diversas áreas de estudo nos últimos anos e permitem tais análises sem as desvantagens de custo e tempo de experimentos laboratoriais (SANTOS; MEDRONHO, 2007; GUIDOLINI, 2009). A fluidodinâmica computacional, mais especificamente, consiste na obtenção de soluções numéricas para os problemas de escoamento de fluidos utilizando o computador. É uma área de grande interesse para a solução de muitos problemas práticos. Como exemplos, podem ser citados problemas de hidráulica, aerodinâmica, termodinâmica, dentre outros (OLIVEIRA, 2004).

A solução do problema de escoamento (com velocidade, pressão, temperatura etc.) é calculada nos nós de cada elemento. A acurácia da solução do problema é governada pelo número de elementos na malha gerada. Geralmente, quanto maior o número de elementos, maior será a acurácia, porém maior será também o custo computacional em tempo de processamento (SIMÕES, 2009).

As análises nesta área podem ser desenvolvidas com base em modelos estabelecidos pelas equações de Navier-Stokes, da conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. Quando são adicionadas as condições iniciais e de contorno, estas equações representam um problema particular. A solução analítica destas equações somente é possível para os casos mais triviais. Para os problemas reais utilizam-se os métodos numéricos (SANT'ANNA, 2012).

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

O advento dos computadores de alta velocidade e grande capacidade de memória tem permitido à CFD a obtenção de solução para muitos problemas de escoamento, incluindo aqueles que são compressíveis ou incompressíveis, (quimicamente) reagentes ou não-reagentes, laminares ou turbulentos, de fase única ou de múltiplas fases. Entre os métodos numéricos desenvolvidos para tratar as equações que regem os problemas de escoamento de fluidos, os mais (amplamente) utilizados são os métodos das diferenças finitas e os métodos dos volumes finitos (POTTER; WINGGERT, 2004), visando obter campos de velocidades, temperaturas, possibilitando, assim, avaliar o transporte de uma propriedade de interesse (MALISKA, 2004).

O procedimento observado na CFD tem como objetivo tornar as investigações experimentais mais eficientes, trazendo, com isso, a possibilidade de um melhor e mais profundo entendimento acerca dos processos de escoamento (CAVALCANTI, 2003).

Para Gomez (2008), os códigos de CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos. Para a resolução de escoamentos de fluidos, os códigos contêm geralmente quatro elementos principais: um gerador geometria, um gerador de malha, um pré-processador ou solver, e um pós-processador.

Sant'anna (2012) aponta os diferentes pacotes computacionais para CFD, uns são para construção de geometria, como o ICEM CFD[®], outros são pacotes mais completos tais como FLUENT[®], CFX[®]. Este é um software de CFD integrado, no qual é possível construir a geometria, fazer a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar posteriormente, sendo utilizado para a simulação de diversos tipos de escoamentos.

Na linha dos códigos comerciais tem-se à disposição inúmeros pacotes, todos eles em códigos fechados, como, por exemplo: FLUENT[®], CFX[®], FIDAP[®] e PHOENICS[®]. Dentre os códigos CFD não comerciais, temos o OpenFOAM[®] como uma alternativa devido ao fato de ser gratuito e distribuído com código aberto (RAMIREZ, 2009). A metodologia utilizada no roteiro para soluções dos problemas de escoamento por cada um desses *softwares* pode ser sintetizada

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

nas seguintes etapas: escolha da geometria de trabalho, identificação das condições físicas, geração de malha, utilização do solver, interpretação das soluções obtidas a partir da visualização dos resultados e apresentação desses últimos (SANT'ANNA, 2012).

Escolhido o código de CFD que se deseja trabalhar, os procedimentos gerais para aplicação e análise do tipo CFD na simulação numérica de escoamentos são comentados a seguir (GOMEZ, 2008):

3.4.1 Etapas da simulação

Formulação do problema

A primeira etapa do processo de análise para formular o problema pode ser auxiliada pelas respostas às seguintes questões:

- Qual é o objetivo da análise?
- Qual a maneira mais fácil de atingir esse objetivo?
- Que tipo de geometria dever-se-ia utilizar para facilitar o processo de análise?
- Quais as condições operacionais em que o fenômeno ocorre?
- Que condição espacial o problema requer (1D, 2D, assimétrica, 3D)?
- Qual o regime temporal apropriado (estacionário, não-estacionário)?
- Qual a natureza viscosa do escoamento (laminar, turbulento)?

Escolha do sistema de coordenadas

A segunda etapa é a utilização de sistemas de coordenadas ortogonais, como o cartesiano, apresenta grandes limitações, pois são adequados apenas para geometrias cujas fronteiras coincidem com as do sistema coordenado. Caso interpolações sejam empregadas nas fronteiras, isto pode levar a soluções imprecisas perto delas, nas regiões onde os parâmetros de interesse sofrem mais variações. Dessa forma, o código computacional utilizado torna-se extremamente dependente da geometria do problema (VIANNA Jr. et al., 2014)

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Vianna Jr. et al. (2014) apontam as principais razões que motivam o emprego de coordenadas generalizadas (coincidentes com as fronteiras). São as seguintes:

- a) necessidade de resolver problemas cada vez mais complexos sobre geometrias arbitrárias;
- b) dificuldades de resolver problemas quaisquer empregando sistemas de coordenadas convencionais (cartesianos, cilíndricos, esférico);
- c) possibilidades de concentração das linhas, apenas onde as mesmas são necessárias, reduzindo o número de pontos necessários e;
- d) possibilidade de desenvolvimento de métodos que buscam a generalidade.

Modelagem da geometria e domínio do escoamento

Como terceira etapa tem-se a modelagem da geometria e o domínio do escoamento do corpo. Isto geralmente envolve a modelagem da geometria com auxílio de um pacote computacional do tipo CAD. Ao mesmo tempo podem ser requeridas aproximações e simplificações dessa geometria para permitir uma análise precisa do fenômeno. Simultaneamente existem decisões a serem tomadas para extrapolação do domínio finito do escoamento a ser simulado (SIMÕES, 2009). As vizinhanças do escoamento podem coincidir com a superfície geométrica do corpo. Outras superfícies sobre as quais o fluido entra e sai são livres. A geometria e o domínio do escoamento são então modelados de modo a permitir a geração de uma malha. Assim a modelagem deve sempre levar em conta a estrutura e a topologia na geração dessa malha (CAMPOS, 2013; SIMÕES, 2009). Para a geração da geometria utilizou-se o pacote computacional Workbench do software *Ansys*, que possui ferramentas de CAD. Com este *software* é possível gerar geometrias elaboradas e complexas, devido a sua grande flexibilidade e recursos disponíveis.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Estabelecimento das condições iniciais e de contorno

A quarta etapa envolve o estabelecimento das condições iniciais e de contorno, onde o sistema de equações diferenciais obtido necessita de condições iniciais e de contorno para ser resolvido. Uma vez que um domínio finito para o escoamento é especificado, as condições físicas são requeridas nas vizinhanças do domínio do escoamento. A simulação geralmente é iniciada com ajuda de solução inicial e usa-se um método iterativo para alcançar a solução final do campo de escoamento. No estudo de problemas envolvendo volumes finitos, o correto e fisicamente consistente é a realização do balanço de propriedades para os volumes de fronteira. Dessa forma, volumes fictícios normalmente são usados com o objetivo de facilitar a aplicação das condições de contorno e estabelecer apenas uma equação para representar todos os volumes do domínio (MALISKA, 2004).

Geração de Malha

A quinta etapa surge com a geração da malha, ou seja, o gerador de malha promove volumes de controle nos quais serão resolvidas todas as equações relacionadas ao problema estudado. Assim, quanto maior for o número de volumes de controle, mais precisa estará a solução. Porém, a demanda de esforço computacional será maior. Desta maneira, é necessário encontrar um limite onde a partir deste, um aumento da quantidade de volumes de controle aumenta o esforço computacional, mas não altera os resultados obtidos. Assim, são feitas simulações com malhas de diferentes números de volumes de controle a fim de encontrar aquela que forneça a maior precisão possível. Este procedimento é conhecido como teste de malha, onde se faz uma análise de um parâmetro chave em cada simulação realizada (NASCIMENTO, 2012a).

O domínio do fluxo é geralmente discretizado em forma de malha. Esse processo de geração de malha determina o mapeamento que transforma os pontos da malha do domínio físico no domínio transformado (MEDRONHO apud SANT'ANNA, 2012).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Na discretização de geometrias complexas, a dificuldade encontra-se associada à necessidade de aplicação das condições de contorno. Por conveniência, procura-se coincidir as linhas do domínio discretizado com as linhas da fronteira do mesmo. Neste caso, aconselha-se a adoção de um sistema generalizado de coordenadas (VIANNA Jr. et al., 2014).

Outra decisão importante a ser tomada no desenvolvimento de um modelo numérico em coordenadas generalizadas é a natureza da malha. As malhas podem ser dos tipos estruturada e não estruturada. A malha não estruturada é aquela para a qual não há uma regra aparente de formação. Dentre as vantagens dessa última encontra-se a facilidade de concentração nas regiões desejadas e o menor número de volumes no domínio. Por sua vez, as vantagens das malhas estruturadas são: conexão entre os pontos estabelecidas por uma regra, facilidade de interpretação computacional e facilidade na solução de sistemas lineares (CAMPOS, 2013).

Estratégias de simulação, estabilidade e condições de convergência

A sexta etapa é caracterizada pelas estratégias de simulação, estabilidade e, ainda, as condições de convergência. Um resultado de uma simulação CFD não deve ser assumido como uma verdade absoluta. Simuladores fluidodinâmicos processam cálculos baseados nos dados de entrada. Caso o usuário entre com lixo no sistema (condições de contorno e modelos que não correspondem ao seu sistema), o simulador mostrará lixo como resultado (resultados quantitativos irrealistas). As razões pelas quais um usuário não deve confiar cegamente em uma modelagem CFD são as seguintes (FONTES apud CRUZ, 2013):

- por questões econômicas, não se utiliza uma malha extremamente refinada com pequeníssimos instantes de tempo, o que gera resultados com valores aproximados em relação ao fenômeno real;
- alguns dados de entrada (geometria, propriedades dos fluidos) são assumidos como constantes ou médios, o que às vezes não corresponde à realidade;

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

- as condições iniciais e de contorno podem representar a situação real muito cruamente;
- o escoamento pode envolver fenômenos como turbulência, radiação ou escoamento multifásico, cuja modelagem é empírica ou semi-empírica e não perfeitamente representados ou entendidos pelas atuais teorias científicas e;
- os métodos numéricos possuem limitações.

A estratégia de simulação envolve a determinação de condições semelhantes ao uso do espaço, ou tempo, como variável independente, a escolha de modelos de turbulência ou químico e a escolha do algoritmo.

São inúmeros os métodos (*Solvers*) que podem ser empregados para resoluções de problemas de escoamento. Entre esses métodos existem os denominados métodos diretos de resolução, tais como: Regra de Cramer, Eliminação de Gauss e Decomposição LU. Existem também iterativos: Jacobi, Gauss-Seidel, Runge-Kutta e SOR (Sobre/Sub-relaxações). Nem sempre a escolha de um *solver* apropriado é tarefa fácil. Entretanto, a literatura tem demonstrado que os métodos SOR e Runge-Kutta têm sido os mais utilizados pela facilidade de aplicação e eficiência (RAMIREZ, 2009).

Durante o desenvolvimento do processo de simulação a solução numérica é monitorada para constatação de que a solução obtida convergiu. Isto ocorre porque a solução numérica de problemas de escoamento contém imprecisões, as quais são limitadas por esse critério de convergência. Na prática é comum a escolha de um critério pequeno o suficiente, de forma a se poder desprezar tais imprecisões (MEDRONHO apud SANT'ANNA, 2012).

Pós-processamento

A sétima etapa recebe a classificação de pós-processamento, ou seja, etapa necessária para analisar os resultados obtidos. Este pacote disponibiliza ferramentas para visualização da geometria e da malha geradas, construção de gráficos com vetores e contorno para avaliação de perfis de velocidade, pressão, concentração, entre outros, inclusive tridimensionais. Nesta etapa é possível definir todos os parâmetros relevantes à simulação a ser realizada, no

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

que diz respeito à modelagem do problema, condições de contorno e propriedades dos fluidos envolvidos. Entradas e saídas do sistema são definidas bem como características do escoamento, modelo de turbulência, resíduo para convergência, dependência temporal, entre outros. Para o alcance de resultados precisos dentro de limites econômicos (esforço computacional), são realizadas simplificações no estudo. Deve-se conhecer com detalhes o fenômeno a ser estudado para avaliar se haverá grande impacto nos resultados (NASCIMENTO, 2012a).

Nascimento (2012a) diz ainda que é possível traçar gráficos relacionando variáveis da simulação, construir tabelas, fazer cálculos no próprio programa, visualizar a trajetória das partículas e linhas de corrente, bem como criar animações para facilitar a análise dos resultados e possibilidade de exportação de resultados para outro *software* de visualização.

As etapas de pós-processamento à aplicação da CFD constam basicamente de visualização e análises dos resultados. A visualização dos resultados é normalmente representada por curvas de níveis, superfícies de respostas, vetores, linhas de corrente e animações.

Nesse sentido, a modelagem computacional aplicada a um sistema de separação água/óleo, como proposto nesse trabalho, possibilitará a obtenção de resultados satisfatórios no que se refere ao tempo de experimentos, à obtenção de uma maior eficiência e à criação de uma nova tecnologia de separação para as indústrias que processam águas residuárias oleosas.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

4. REFERÊNCIAS

ARRUDA, A. A. **Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido.** 2008. 40p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento em Processos Ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

AZEVEDO, A. C. **Estudo de flotação por ar dissolvido com a bomba multifásica (FAD-B) e sedimentação lamelar (SL) no tratamento de água bruta para abastecimento público (Canoas-RS).** 2012. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Canoas, 2013.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no Tratamento de Minérios.** 2008. 211p. Departamento de Engenharia de Minas – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 211p. 2008.

BANDE, R. M.; PRASAD, I. M.; MISHRA, K. L. Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation. **Chemical Engineering Journal**, v. 137, p. 503 – 509, 2008.

BARBOSA, G. M. **Processo de clarificação convencional combinado com microfiltração visando ao reúso de efluente da indústria sucroalcooleira.** 2011. 160p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BAKER, R. W. **Membrane Technology and Applications.** Second edition. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2004, 538p. ISBN: 9780470020395.

BEEBY, J. P.; NICOL, S. K. Concentration of oil-in-water emulsion using the air-sparged hydrocyclone. **Filtration & Separation**, v. 30, n. 2, p. 141 - 146, mar./abr. 1993.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

BEHIN, J.; BAHRAMI, S. Modeling an industrial dissolved air flotation tank Used for separating oil from wastewater. **Chemical Engineering And Processing: Process Intensification**, v. 59, p. 1 – 8, 2012.

BERNARD, C.; HERVIOU, P.; POUJOL, T. Stormwater treatment by dissolved air flotation: first results from a pilot project. **Water Science And Technology**, v. 32, n. 1, p. 137 – 143, 1995.

CAMBOIM, R. A. **Técnica de eletroflotação aplicada na remoção de cores de efluentes têxteis.** 2010. 223p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

CAMPOS, J. R.; REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCHETTO, M.; LIMA, M. R. A. Tratamento Físico-Químico Por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios. In: **XXV CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIARIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 96**, 1996. Cidade do México. *Anais...* Cidade do México: AIDIS, 1996, v. 1, p. disco.

CAMPOS, L. C. **Modelagem do escoamento de fluidos em meios porosos utilizando a estrutura de dados *Autonomous Leaves Graph*.** 2013. 88p. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

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

CÂNDIDO, F. A. A. **Tratamento da água para descarte ou reinjeção.** 2011. 12p. Trabalho Acadêmico, Mossoró/RN, 2011.

CARTIER, M. L. M. **Desenvolvimento de um sensor para monitoramento "on-line" da contaminação da água por hidrocarbonetos.** 2005. 72p. Iniciação Científica (Universidade Federal de Itajubá) - Programa de Recursos

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Humanos da ANP Para o Setor de Petróleo e Gás - PRH-ANP/MME/MCT, Itajubá/MG. 2005.

CAVALCANTI, R. S. **Estudo fluidodinâmico do desprendimento de H₂ em uma célula eletrolítica utilizando o aplicativo computacional CFX.** 2003. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

CAVAZZANA, T. L.; MATSUMOTO, T.; LIBÂNIO, M. Avaliação da floco-decantação de manta de lodo associada à decantação de alta taxa no tratamento de águas de consumo humano. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 126 – 133, 2008.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul, Deliberação nº 8, de 06 de dezembro de 2001. Dispõe sobre a implantação da cobrança pelo uso dos recursos hídricos na Bacia do Rio Paraíba do Sul a partir de 2002.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation And Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11 – 41, 2004.

CHERYAN, M.; RAJAGOPALAN, N. Membrane processing of oily streams: wastewater treatment and waste reduction. **Journal of Membrane Science**, v. 151, n. 1, p. 13 – 18, 1998.

CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para à pratica de reuso direto não potável de água.

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

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

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

COSTA, C. A. **Remoção de amônia de efluentes líquidos com o uso de microbolhas: fundamentos e aplicações.** 2003. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

COUTINHO, W. **Emprego da flotação a ar dissolvido no tratamento de cursos d'água:** avaliação de desempenho da estação de tratamento dos Córregos Ressaca e Sarandi afluentes à represa da Pampulha. 2007. 104p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CRESPILHO, F. N.; REZENDE, M. O. O. **Eletroflotação:** princípios e aplicações. São Carlos: Editora Rima, 2004.

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

CRUZ, D. B. **Estudo hidrodinâmico computacional de reator uasb em escala de bancada com validação experimental.** 2013. 70p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão. 2013.

CUNHA, R. E. P. **Modelagem matemática da separação gravitacional de emulsões de petróleo.** 2007. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2007.

DE RIJK, S. E.; GRAAF JAAP, H. P.M.; AIVAN DER, J. G.; DEN BLANKEN. Bubble size in flotation thickening. *Water Research*, v. 28, n. 2, p. 465 - 473, 1994.

DUPRE, V.; PONASSE, Y.; SECQ, A. Bubble formation by water release in nozzles – I. Mechanisms. *Water Research*, v. 32, n. 8, p. 2491 – 2497, 1998.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, n. 7, p. 2077 – 2106. 2010.

EDZWALD, J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. **Water Science And Technology**, v. 31, n. 3 - 4, p. 1 - 23, 1995.

EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; DUNN, H.; KAMINSKI, G.; GALANT, P. Removal and fate of cryptosporidium in dissolved air drinking water treatment plants. **Water Science And Technology**, v. 43, n. 8, p. 51 – 57, 2001.

ENGLERT, A. H. **Flotação por ar dissolvido (FAD) de micropartículas, caracterização de microbolhas e medidas de forças de interação bolha-partícula.** 2008. 139p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

EVANS, L. F. Bubble-minerals attachment in flotation. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 46, n. 11, p. 2420 – 2424, 1954.

FERNANDES, T. C. **Utilização do sistema de flotação por ar dissolvido para o tratamento das águas da bacia hidrográfica do Rio Urussanga e avaliação deste processo através de ensaios de toxicidade em organismos bioindicadores *artemia sp* e *allium cepa* I.** 2010. 40p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Curso de Ciências Biológicas. Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2010.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de curtume.** 2007. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade ‘Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

GAO, P.; CHEN, X.; SHEN, F.; CHEN, G. Removal of chromium (iv) from wastewater by combined electrocoagulation – electroflotation without a filter. **Separation and Purification Technology**, v. 43, n. 2, p. 117 – 123, 2005.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

GE, J.; QU, J.; LEI, P.; LIU, J. New bipolar electrocoagulation – electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. **Separation And Purification Technology**, v. 36, n. 1, p. 3 – 39, 2004.

GOBBI, L. C. A. **Tratamento de água oleosa por eletrofloculação.** 2013. 120p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

GOMES, E. A. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo por eletroflotação e processo fenton.** 2009. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracajú, 2009.

GOMEZ, D. A. **Análise do escoamento compressível de gás natural em espaços anulares com restrições para à elevação de petróleo.** 2008. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

GREET, C. J.; SMALL G. L.; STEINIER, P.; GRANO S. R. The magotteaux mill: investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 891 - 896, 2004.

GUIDOLINI, I. P. **Análise fluidodinâmica e do efeito de misturadores estáticos em um reator tubular de polimerização usando ferramentas de CFD.** 2009. 99p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GUIMARÃES, P. S. **Tratamento de águas residuárias oriundas da purificação do biodiesel por coagulação empregando sulfato de alumínio e quitosana: avaliação preliminar.** 2013. 93p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater. **Desalination**, v. 311, p. 90 – 94, 2013.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

HAARHOHH, J.; VAN VUUREN, L. R. J. Design parameters for dissolved air flotation in South Africa. **Water Science And Technology**, v. 32, n. 3 – 4, p. 203 – 212, 1995.

HALL, T.; PRESSDEE, J.; GREGORY, R.; MURRAY, K. Cryptosporidium removal during water treatment using dissolved air flotation. **Water Science And Technology**, v. 31, n. 3 - 4, p. 125 – 135, 1995.

HOSNY, A. Y. Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. **Separation Technology**, v. 6, n. 1, p. 9 – 17, 1996.

HUI, W.; XIAO-LEI, C.; YANG, B.; CHAO, G.; LI, Z. Application of dissolved air flotation on separation of waste plastics ABS And PS. **Waste Management**, v. 32, n. 7, p.1297 – 1305. 2012.

HYDE, R. A.; D. G. MILLER.; R. F. PACKHAM.; W. N. RICHARDS. Water clarification by flotation – 4, WRC TR 13. **Journal American Water Works Association**, v. 69, n. 7, 1975.

ITYOKUMBUL, M. T.; AQUINO, J. A.; O' CONNOR, C. T.; HARRIS, M. C. Fine pyrite flotation in an agitated column cell. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58, n. 1, p. 167 – 178, 2000.

JACKSON, M. L. Energy effects in bubbles nucleations. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 33, n. 4, p. 929 – 933, 1994.

JAUREGI, P.; VARLEY, J. Colloidal gas aphrous: potential applications in biotechnology. **Trends in Biotechnology**, v. 17, n. 10, p. 389 – 395, 1999.

JORDAN, A. T. **Liquid phase plasma thecnology inkjet separation.** 2013. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Biomolecular) – Institute of Technology, Georgia, 2013.

JUSTINO, D. G. **Os Principais equipamentos de uma unidade de processamento primário de óleo.** 2010. 44p. Trabalho de Conclusão de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Curso II (Graduação em Tecnólogo de Gestão de Produção de Petróleo e Gás) – Faculdade Capixaba de Nova Venécia, Nova Venécia, 2010.

KIURU, H. J. 2000. Development of dissolved air flotation technology from the 1st generation to the newest or 3rd one (very thick micro-bubble bed) with high flowrates (daf in turbulent flow conditions). **In: INTERNATIONAL CONFERENCE:FLOTATION IN WATER AND EAST E WATER TREATMENT**, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000. p. 11 - 14.

KIURU, H. J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). **Water Science And Technology**, v. 43, n. 8, p. 1 - 7, 2001.

KOBYA, M.; HIZ, H.; SENTURK, E.; AYDINER, C.; DENIRBAS, E. **Desalination**, v. 190, n. 201, 2006.

LAINÉ, S.; POUJOL, T.; DUFAY, S.; BARON, J.; ROBERT, P. Treatment of stormwater to bathing water quality by dissolved air flotation: filtration and ultraviolet disinfection. **Water Science And Technology**, v. 38, n. 10, p. 99 – 105, 1998.

LEITE, J. C. A.; VILAR, E. O.; CAVALCANTI, E. B.; SALES FILHO, I. O. Aplicação da eletroflotação para remoção de óleo emulsionado em águas de produção de campos de petróleo. **In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS**, 2007, São Paulo. PDPETRO 2007. **Resumos...** Campinas/SP, 2007.

LEPPINEN, D. M.; DALZIEL, S. B. Bubble size distribution in dissolved air flotation tanks. **Journal of Water Supply: Research And Technology – AQUA**, v. 53, p. 531 – 543, 2004.

MAIA, K. A. **Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicado no tratamento de águas para abastecimento.** 2010.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

102p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MALISKA, C. R., **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S. A., 2ª Ed., 2004.

MATIS, K. A.; PELEKA, E. N. Alternative flotation techniques for wastewater treatment: focus on electroflotation. **Separation Science and Technology**, v. 45, n. 16, p. 2465 - 2474, 2010.

MELBOURNE, J. D.; ZABEL, T. F. Flotation for water and waste treatment, **Papers And Proceedings**, WRC Conf., Felixstowe, UK, 1976.

MEYSSAMI, B.; KASAEIAN, A. B. Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation. **Bioresource Technology**, 2005, v. 96, p. 303 - 307.

MOLLAH, M. Y. A.; PARGA, R. S. J. R.; COCKE, D. L. Electrocoagulation (EC) – science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, 2001, v. B84, p. 29 – 41.

MORUZZI, R. B. **Avaliação da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da flotação com utilização de sonda ultrasônica e técnica de análise por imagem.** 2005. 240f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests. **Water Science And Technology**, v. 61, n. 1, p. 253 – 262, 2010.

MOTTA, A. R. P.; BORGES, C. P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K. P.; ARAÚJO, P. M.; BRANCO, L. P. N. Tratamento de água produzida de petróleo

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 1, 2013, p. 15 – 26.

MUSQUERE, P. E. F.; VIK, E. A. Electrotechnics in drinking and wastewater, **Water Supply, 8 Special Subject**, v. 2, n. 3, p. 8 – 25, 1983.

NASCIMENTO, L. A.; SARUBBO, L. A.; GAMA, P. H. R. P.; LIMA FILHO, H. J. B.; SANTOS, V. A. Modelagem e simulação via CFD do tratamento por hidrociclone de água do mar contaminada por derivado de petróleo **In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE**, 2012, Rio de Janeiro. RIO OIL & GAS 30 YEARS. **Resumos...** RIO DE JANEIRO: IBP, 2012a.

NASCIMENTO, L. A.; SARUBBO, L. A.; GAMA, P. H. R. P.; LIMA FILHO, H. J. B.; SANTOS, V. A. Simulação da descontaminação da água do mar por derivado de petróleo em decantação contínua **In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA**, Búzios. COBEQ 2012. **Resumos...** RIO DE JANEIRO: Associação Brasileira de Química, p. 4888 – 4895, 2012b.

OLIVEIRA, D. S. T. **Simulação numérica de um hidrociclone para separação de esferas ocas de lama de perfuração.** 2004. 133p. Trabalho de Final de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2004

OLIVEIRA, J, R. Flotação. **In: Tendências Tecnológicas do Brasil 2015 - geociências e tecnologia mineral.** Eds.: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; MATOS, G. M.; CASTILHOS, Z. C. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. p. 133 – 156, 2007.

OLIVEIRA, J. S. **Tratamento de água produzida utilizando a eletroflotação e o processo combinado eletroflotação/fenton em reator de ciclo fechado.** 2012. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracajú, 2012.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

PACKHAM, R. F.; RICHARDS, W. N. Water clarification by flotation – 3: treatment of thames water in a pilot–scale flotation plant. **Water Research**, 39p, 1975.

PANIZZI, R. T. **Conversão de um navio petroleiro em um navio de tratamento de água de formação.** 2013. 79p. Projeto de final de curso (Engenharia Naval e Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PATRIZZI, L. J. **Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento, com uso de flotação por ar dissolvido de alta taxa e oxidação química.** 2002. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PHILIPPOFF, W. Some dynamic phenomena in flotation. **Minerals Engineering**, v. 4, p. 386 – 390, 1952.

PICCININI, C. A. **Transferência de calor e massa II.** Apostila. Coleção Principal de Objetos de Aprendizagem do Campus Porto Alegre, Porto Alegre, 44p. 2013.

PIOLTINE, A. **Avaliação do desempenho de bomba multifásica na geração de microbolhas de ar para o processo de flotação por ar dissolvido aplicado ao pré-tratamento de efluente de indústria têxtil.** 2009. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PIOLTINE, A.; REALI, M. A. P. Emprego de bomba multifásica como unidade geradora de microbolhas de ar em sistema de flotação aplicado ao pré-tratamento de efluente têxtil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.16, n.2, p. 167 – 174, 2011.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C., **Mecânica dos Fluidos**, São Paulo, Thomson, 3^a Ed., 2004.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

RAMIREZ, M. V. **Simulação da perda de carga e da eficiência da coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD).** 2009. 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, p.15 - 16. 2009.

REALI, M. A. P. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante.** 1991. 427p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. High-rate dissolved air flotation for water treatment. **Water Science And Technology**, v. 43, n. 8, p. 43 – 49, 2001.

REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. Unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água. In: **XXV CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 96**, 1996, Cidade do México. Anais Magnéticos do XXV Congresso da AIDIS/96. Cidade do México: AIDIS, 1996, v. 1, p. disco.

REALI, M. A. P.; SANTOS, S. P. Flotação por ar dissolvido em escala piloto com escoamento vertical entre placas para remoção de algas em águas de abastecimento. In: **XXV CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 96**, 1996, Cidade do México, Anais Digitais do XXV Congresso da AIDIS/96. Cidade do México: AIDIS, 1996, v. 1, p. disco.

REES, A. J.; RODMAN, D. J.; ZABEL, T. F. Water Clarification By Flotation – 5. **Water Research**, 56p.,1979.

RIBEIRO, J. A. **Contribuição ao estudo experimental e em CFC da fluidodinâmica de colunas de bolhas com aplicações na separação de misturas oleosas e processamento mineral por ar dissolvido.** 2012. 243p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

RICHTER, C. A.; GROSS, F. Dissolved air flotation in Latin America. **In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND EASTWATER TREATMENT**, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000. v. 1, p. 1 - 9.

RICORDEL, C.; DARCHEN, A.; HADJIED, D. Electrocoagulation – electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. **Separation And Purification Technology**, v. 74, n. 3, p. 342 – 347, 2010.

RODRIGUES, J. B. S. B. M. **Contributo para o estudo das principais tecnologias de tratamento utilizadas no tratamento de efluentes provenientes da indústria petrolífera.** 2008. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa - Campus Monte de Caparica, Portugal, 2008.

RODRIGUES, R. T. **Desenvolvimento da técnica LTM-Bsizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação.** 2004. 114p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. DAF - Dissolved air flotation: potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p.1 – 13, 2007.

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. New bases for measuring the size distribution of bubbles. **Minerals Engineering**, v. 16, n. 8, p. 757 – 765, 2003.

RODRIGUES, W. J.; LEAL FILHO, L. S.; MASINI, E. A. Hydrodynamic dimensionless parameters and their influence on flotation performance of coarse particles. **Minerals Engineering**, v. 14, n. 9, p. 1047 – 1054, 2001.

ROSA, J. J.; RUBIO, J. The f - f (flocculation–flotation) process. **Minerals Engineering**, v. 18, p. 701 – 707, 2005.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

RUBIO, J.; CARISSIMI, E.; ROSA, J. Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 30, n. 2, p. 193 – 207, 2007.

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

RUCKENSTEIN, E.; DJIKAEV, Y. S. Recent developments in the kinetic theory of nucleation. **Advances in Colloid And Interface Science**, v. 118, p. 51 – 72, 2005.

SANT'ANNA, M. C. S. **Otimização de um misturador estático para a produção de biodiesel.** 2012. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão. 2012.

SANTANA, C. R. **Tratamento de água produzida através do processo de flotação utilizando a *Moringa oleifera Lam* como coagulante natural.** 2009. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2009.

SANTANDER, M.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water separations. **Colloids And Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 375, p. 237 – 244, 2011.

SANTOS, A. C. S.; CRUZ, S. M.; SOLETTI, J. I.; CARVALHO, S. H.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S.; MIRAPALHETA, A. Tratamento de efluentes sintéticos da indústria de petróleo utilizando o método da eletroflotação. In: **4º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS**, 2007, São Paulo. PDPETRO 2007. **Resumos...** Campinas/SP, 2007.

SANTOS, F. P.; MEDRONHO, R. A., Simulação numérica da fluidodinâmica de riser de craqueamento catalítico. In: **4º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO**, 2007, São Paulo. PDPETRO. 2007. **Resumos...** Campinas/SP, 2007.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

SARUBBO, L. A.; LUNA, J. M.; RUFINO, R. D.; FARIAS, C. B. B.; SANTOS, V. A. Production of biosurfactants for application in the removal of hydrophobic contaminants originated by the petroleum industry **In: CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, Milan. 5th International Conference on Safety and Environmental in Process & Power Industry. Milan: The Italian Association of Chemical Engineering, v.27, 2012a.

SARUBBO, L. A.; RUFINO, R. D.; LUNA, J. M.; FARIAS, C. B. B.; SANTOS, V. A. Utilização de superfície de resposta para otimização da produção de um biossurfactante com aplicação na remoção de derivados de petróleo **In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE**, 2012, Rio de Janeiro. RIO OIL & GAS 30 YEARS. **Resumos...** RIO DE JANEIRO: IBP, 2012c.

SCHOFIELD, T. Dissolved air flotation in drinking water production. **Water Science & Technology**, v. 43. n. 8, p. 9 – 18, 2001. ISSN: 0273 – 1223.

SCHONS, E. M. **Desestabilização de emulsões visando a redução do teor de óleo em água.** 2008. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2008.

SHEN, Y.; LONGO, M. L.; POWELL, R. L. Stability and rheological behavior of concentrated monodisperse food emulsifier coated microbubble suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 327, n. 1, p. 204 - 210. 2008.

SILVA, C. F. **Remoção de oocistos e de indicadores físicos de *Cryptosporidium parvum* em águas de abastecimento por meio da decantação – estudo em escala piloto.** 2008. 117p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, M. F. S. **Simulação do intertravamento, controle e CLP de uma planta de processamento primário de petróleo.** 2011. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Salvador, Salvador, 2011.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD.** 2009. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

SOHAIR, I.; ABO-EL, E.; SAMIRA, S. N. Treatment of wastewater from an oil and soap factory via dissolved air flotation. **Environment International**, 1980, v. 4, p. 47 - 52.

TAKAHASHI, T.; MIYAHARA, T.; MOCHIZUKI, H. Fundamental study of bubble formation in dissolved air pressure flotation. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 12, n. 4, p. 275 – 280, 1979.

TESSELE, F.; MONTEGGIA, L. O.; OLIVEIRA, D.; RUBIO, J. Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbico por flotação em dois estágios e desinfeto. **VII Semana de Engenharia Ambiental**, Campus Irati, 2009.

TESSELE, F.; ROSA, J.; SOUZA, M. L.; RUBIO, J. **Os avanços da flotação no tratamento de águas, esgoto e efluentes.** Parte II: Aplicações. Saneamento Ambiental, n. 115, 2005.

THEODORO, P. S. **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes na indústria galvânica.** 2010. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.

THOMAS, J. E. (Org). **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Rio de Janeiro, Interciência, 2^o ed. Rio de Janeiro: Petrobrás, v. 271, p. 255 – 271, 2004.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W., **An introduction to computational Fluid Dynamics.** Longman Group Ltd, Malaysia, 1995.

VIANNA Jr., A. S.; SIQUEIRA, F. C. S.; RADUSWESKI, L.; LIMA, A. L. S. CFD e a defesa química. **Virtual Química**, v. xx, n. xx, 2014.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

XU, Q.; NAKAJIMA, M.; ISHIKAWA, S.; NAKAMURA, N.; ROY, P.; OKADOME, H.; SHIINA, T. Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 332, n. 1, p. 208 - 214, 2009.

ZABEL, T. The Advantages of dissolved air flotation for water treatment. **Journal AWWA**, p. 42 – 46, 1985.

ZHANG, Y.; LEPPINEN, D. M.; DALZIEL, S. B. A New nozzle for dissolved air flotation. In: **THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOTATION IN WATER AND WASTEWATER SYSTEMS**, Seul, Korea, 2007.

ZHOU, Z. A.; ZHENGHE XU, J. A. FINCH. On the role of cavitation in particle collection during flotation – a critical review. **Minerals Engineering**, v. 7, n. 9, p. 1073 – 1084, 1994.

ZODI, S.; MERZOUK, B.; POTIER, O.; LAPICQUE, F.; LECLERA, JEAN-PIERRE. Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor. **Separation and Purification Technology**, v. 108, p. 215 – 222, abr. 2013.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

CAPÍTULO 2

**ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO NO
PERIÓDICO CHEMICAL ENGINEERING &
TECHNOLOGY**

**GERAÇÃO DE MICROBOLHAS UTILIZANDO UMA
BOMBA CENTRÍFUGA**

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

GERAÇÃO DE MICROBOLHAS UTILIZANDO UMA BOMBA CENTRÍFUGA

R. C. S. Henauth^{1,4}, R. S. Vasconcelos^{1,4}, A. E. Moura^{2,4}, L. A. Sarubbo^{3,4}, V. A. Santos^{3,4}

¹ *Mestrando em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n. 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil*

² *Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Professor Moraes do Rego, n. 1235, Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil*

³ *Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n. 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil*

⁴ *Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação - CGTI, Rua da Praia, n. 11, São José, CEP: 50000-000, Recife, Pernambuco, Brasil*

Versão encurtada do título: Produção de Microbolhas

Endereço de correspondência para Leonie Asfora Sarubbo, Centro de Ciências e Tecnologia Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n. 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil. Tel.: (81)21194084; fax.: (81)21194043. E-mail: leonie@unicap.br

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Resumo

Foi desenvolvida uma técnica para a produção de microbolhas de ar, reduzindo-se espaço e custos com energia em relação ao processo convencional de saturação do efluente tratado com ar comprimido. A referida técnica foi aplicada em um protótipo de bancada de flotação por ar dissolvido (FAD), como uma etapa do tratamento de águas oleosas. Para aquisição de dados sobre a eficiência da técnica utilizada foi aplicado um delineamento composto central rotacional (DCCR). A eficiência de separação foi 97 %. Este elevado grau de separação água-óleo em comparação com valores médios reportados na literatura demonstra o desempenho superior do presente método.

Palavras-chave: Microbolhas, Bomba Centrífuga, DCCR, Água Residuária Oleosa, Tratamento de Água Residuária.

1. Introdução

Frente às exigências cada vez mais rigorosas dos órgãos reguladores ambientais, o enquadramento de efluentes do tipo água oleosa, gerada em diversas atividades industriais, constitui-se atualmente em um dos maiores desafios. Efluentes de lavagens de piso, tanques, veículos, máquinas, peças, entre outras atividades, necessitam de tratamento, tornando possível o reúso, ou reaproveitamento dessa água. Para o cumprimento às legislações ambientais não basta simplesmente retirar o óleo que está presente na forma livre, sendo necessária também a remoção da quase totalidade do óleo que está presente na forma emulsionada (AHMADUN et al., 2009). Efluentes de termelétricas, usinas de açúcar e álcool, indústrias petroquímicas, indústrias de tintas, indústrias metal mecânica, indústrias de tratamento de minério, indústrias frigoríficas, indústrias de laticínios, são algumas das empresas com demanda para esse tipo de processo de tratamento de águas oleosas (RENNOLA et al., 2007; DAIMINGER et al., 1995).

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

O cisalhamento causado por bombas, válvulas, restrições hidráulicas e outros equipamentos dispersa o óleo na água, formando emulsões, que podem apresentar-se altamente estabilizadas pela presença de sólidos finamente divididos, substâncias surfactante naturais do petróleo e outros reagentes adicionados durante o processo de produção de óleos lubrificantes e combustíveis (SUN et al., 2012). O descarte ou até mesmo a reinjeção da água oleosa só são permitidos após a remoção do óleo e sólidos em suspensão em níveis aceitáveis. No Brasil, a concentração de óleo nos efluentes descartados pelas plataformas não deverá exceder o valor de 20 mg.L^{-1} , relativa ao teor de óleos e graxas (CONAMA, 2005).

De modo geral, a literatura apresenta diversos trabalhos, visando o estudo de processos para a separação de emulsões água/óleo (SUN et al., 2012). Muitas técnicas para a separação dessas emulsões estão disponíveis, envolvendo técnicas como ultrafiltração, microfiltração, separação por gravidade, flotação por ar dissolvido, flotação em coluna, eletroflotação, flotação por ar induzido, biorreator de membrana, adsorção de carbono, coagulação química e eletrocoagulação (AHMADUNN et al., 2009; MATIS e PELEKA, 2010). Durante as últimas décadas a flotação por ar dissolvido (FAD) tem encontrado grande aplicação no tratamento de águas oleosas (Xu et al., 2014). A FAD é um processo de separação em que microbolhas nucleadas são geradas e misturadas a uma suspensão que contém partículas de óleo dispersas (KNOW et al., 2012). A colisão e fixação entre essas bolhas e partículas formam aglomerados de baixa densidade, os quais ascendem à superfície da massa líquida, formando uma camada flutuante de espuma, que pode ser removida mecânica ou hidraulicamente (CHERYAN e RAJAGOPALAN, 1998; RUBIO et al., 2002). Para aqueles que não acompanham desenvolvimentos recentes, no que diz respeito aos processos industriais envolvendo bolhas de gás em líquidos, pode ser uma surpresa vislumbrar a grande variedade de aplicações bem como a velocidade com que avançam as pesquisas nesse campo (SANTANDER et al., 2011; BUTLER et al., 2011).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Apesar da eficácia de DAF no processo de separação de óleo em água, a produção de microbolhas é dispendiosa (KNOWTON, 2000), como o uso de compressores e tanques pressurizados ou o uso de bombas multifásicas para a produção de efluentes saturada envolve um gasto considerável de energia (SADATOMI et al., 2010). Assim, a utilização de equipamentos mais compactos e econômicos são necessários. Este artigo descreve o desenvolvimento de um método de produção de microbolhas que podem ser usadas para substituir os métodos convencionais dispendiosos (RUZICKA; BUNGANIC; DRAHOS, 2009).

2. Material e métodos

2.1 Material

O protótipo DAF foi construído para o tratamento de água oleosa em regime contínuo (SILVA et al., 2014). Ele tem duas câmaras de flotação dispostas lado a lado, com capacidade para tratar $1 \text{ m}^3 / \text{h}$ de água oleosa e permite a recirculação de igual volume por hora de água tratada para produção de microbolhas. O protótipo foi construído de acrílico transparente para permitir a visualização da distribuição das microbolhas (Fig. 1) durante os testes.

O processo de flotação realizado pelo protótipo pode ter início em duas antecâmaras em série com as câmaras de FAD, onde pode ocorrer a adição de substâncias surfactantes, responsáveis pela desestabilização da emulsão água-óleo. Na primeira antecâmara pode-se dosar o surfactante com auxílio de um agitador mecânico. Na segunda antecâmara um misturador estático completa a homogeneização. Em seguida, o fluxo de líquido a ser tratado entra em contato na primeira câmara de FAD modificado com um fluxo de microbolhas distribuído de forma homogênea por toda a seção transversal de entrada da câmara.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Os flocos resultantes da combinação das partículas de óleo cercados por microbolhas flutam por diferença de densidade com a fase aquosa. Essa espuma oleosa flotada é induzida, pelo deslocamento do fluxo através das câmaras de flotação, a cair em um coletor que fica na extremidade superior de cada câmara. Serem coletada parte superior de cada câmara são retiradas as de cada câmara. A água tratada sai pela parte inferior da primeira câmara e entra, imediatamente, em contato com um segundo fluxo de microbolhas, repetindo-se a sequência de etapas da flotação na câmara anterior.

O efluente sintético utilizado nas experiências foram preparadas com a ajuda das velocidades de fluxo de água de alimentação e de óleo lubrificante *inlet* do protótipo. Óleo de motor foi selecionado como óleo contaminante que está comercialmente disponível para uso em motores de flex (gasolina, álcool e GNV), Tipo SAE 20W-50, com o protetor sintético (PETROBRAS). É constituída por uma base de óleo de lubrificação parafínico (uma mistura complexa de hidrocarbonetos) e aditivos melhoradores de desempenho.

Foi necessária a manutenção de um efluente de concentração conhecida alimentando o protótipo de FAD. Para isso foi necessário recircular a água tratada com auxílio de uma bomba para um tanque de mistura água-óleo (Fig. 2). Conectada a esse tanque uma bomba de mistura mantinha uma parte da água recirculando para o tanque, promovendo o contato íntimo da água com uma camada de óleo, mantida na superfície da mistura. A parte complementar do fluxo de água oleosa alimentava o protótipo de FAD com um fluxo desse efluente sintético. Com essa estratégia obteve-se um teor constante de óleo em água de 125 mg.L^{-1} .

O mecanismo para a produção de microbolhas envolve a entrada de ar controlada por um rotâmetro no tubo de sucção de uma bomba centrífuga (Fig. 3). A bomba selecionada para esta aplicação possui altura manométrica total de 60 metros de coluna de água (m.c.a) e motor com 2,0 hp de potência,

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

embora a tubulação de descarga possua poucos acessórios Esta bomba foi instalada acima da superfície do líquido para assegurar a pressão negativa na entrada da bomba. Esse fluxo de ar atmosférico mistura-se com a água que está sendo aspirada pela bomba tanto no interior da carcaça deste equipamento, quanto ao longo de sua linha de descarga. Uma válvula instalada próxima ao final da linha de descarga dessa bomba deve ter sua abertura monitorada para produzir uma pressão entre 1,5 e 5,5 bar medidos por um manômetro do tipo Bourbon. Esse efeito de pressurizar a referida linha é essencial para a produção dessas microbolhas. Deve-se, contudo, evitar uma entrada de ar excessiva para a bomba, sob pena de se provocar um fenômeno de redução de sua eficiência, pelo acúmulo de ar no seu interior. Acontecendo esse excesso de admissão de ar, a bomba para de transportar água e, a exemplo do que acontece com o fenômeno de cavitação desse equipamento, pára de recalcar líquido.

A distribuição de microbolhas foi avaliada com o auxílio do software CFX da ANSYS® (Fig. 4). Uma máquina fotográfica submersa de marca SONY, modelo DSC-TS1, foi utilizada para registrar a distribuição do fluxo de microbolhas na câmara de flotação do protótipo de FAD (Fig. 5). A distribuição prevista e confirmada pela fotografia do protótipo, registrou a existência de um fluxo de água isento de microbolhas de ar na parte inferior no final da câmara de flotação, onde se faz, de forma adequada, a introdução de líquido para nova flotação na câmara seguinte, ou descarte, ou recirculação de água tratada (SILVA, et al., 2014).

A eficiência da formação de flocos depende naturalmente da existência de mais ou menos microbolhas introduzidas no meio (SILVA et al., 2014). As microbolhas agregam-se às gotas de óleo, formando uma estrutura maior que a dessas gotas isoladas, porém mais leve, sendo por esse motivo levados para a superfície da câmara de flotação (VASCONCELOS et al, 2015; SILVA et al., 2014). Uma estratégia para se comparar as eficiências de produção de

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

microbolhas foi confrontar as eficiências do processo de separação utilizando-se o FAD.

2.2 Métodos

Metodologia de superfície de resposta (RSM) oferece uma grande quantidade de informação a partir de um pequeno número de experimentos, pois utiliza de delineamentos especiais que ajudam no aprimoramento do modelo a ser construído (MONTGOMERY, 2005). Um delineamento composto central rotacional (DCCR) é o mais popular modelo de RSM, para os experimentos, devido às suas vantagens óbvias de rotacionalidade e a capacidade de analisar os efeitos de interação. Inclui três grupos de pontos de delineamento. Pontos fatoriais que consiste de todas as combinações possíveis dos 1 e -1 níveis dos fatores; pontos axiais que têm todos os fatores definidos para 0, o ponto médio, com exceção de um fator, que tem o valor +/- Alpha; e pontos centrais, que são pontos com todos os níveis previstos de nível codificada 0, o ponto médio de cada uma gama de fatores. O ponto central do delineamento é repetido quatro ou mais vezes para obter uma boa estimativa do erro experimental (variância do erro puro). De acordo com Myers; Montgomery; Anderson, (2009) este procedimento de repetição dá uma estimativa da variação adequada da resposta e fornece o número de graus de liberdade necessários para um teste estatístico adequado do modelo. Por outro lado, um delineamento composto central rotacional requer cinco níveis de cada um dos fatores: -alfa, -1, 0, 1, e Alpha +. Delineamentos rotacionais fornecem a propriedade desejável de variância para a predição da(s) constante(s) em todos os pontos que são equidistantes do centro da concepção, melhorando assim a qualidade da predição. Um delineamento composto central rotacional (DCCR) 2^2 foi empregado utilizando a razão entre o escoamento de ar / água para a produção de microbolhas (X_1) e a pressão no tubo de descarga da bomba de microbolhas (X_2) como variáveis independentes. A Tabela 1 apresenta os termos reais e codificados dos valores usados nos ensaios. O

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

experimento requer um total de 12 ensaios: quatro pontos fatoriais, quatro pontos centrais e quatro pontos axiais.

3. Resultados e discussão

Como variável resposta do planejamento tipo CCRD foi utilizada a eficiência de separação água-óleo no protótipo FAD. A Tabela 2 apresenta os valores das variáveis resposta para cada conjunto de experimento. Observando-se a referida tabela chega-se às seguintes observações sobre as condições operacionais do processo:

- valores intermediários das variáveis independentes levaram a uma eficiência máxima, implicando em uma escolha correta das faixas de valores adotados para essas variáveis e condições de trabalho;
- O valor máximo da eficiência de separação obtido corresponde aos níveis de recuperação de óleo com o auxílio das substâncias desestabilizadoras dos agentes tensioactivos do tipo biosurfactantes (SILVA et al., 2015; KURNIAWATI; ISMADJI; LIU, 2014; HONGXIANG et al., 2015).
- valores mínimos dos fatores, ou variáveis independentes, levaram a um valor mínimo de eficiência de separação, provavelmente pelo aumento de tamanho das microbolhas e pela baixa quantidade de ar para formação das mesmas - conforme observado visualmente;
- valor máximo de pressão, mantido um valor intermediário da razão entre as vazões de ar e água para produção de microbolhas, leva a uma baixa eficiência, provavelmente pela redução da vazão dessa água, motivada pela pequena abertura da válvula que controla a pressão;
- valor máximo da razão entre as vazões de ar e água para produção de microbolhas, mantido um valor intermediário de pressão, leva a uma considerável eficiência, sem atingir o valor máximo, provavelmente pela

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

quantidade excessiva desses componentes de formação de microbolhas, para uma abertura adequada da válvula que controlava a pressão.

A Tabela 3 mostra os resultados da análise de variância (ANOVA) para a aquisição de um modelo de previsão com um intervalo de confiança de 95 %. A correlação entre os dados experimentais e os valores previstos pelo modelo foi satisfatória ($R^2 = 97\%$). Além disso, o teste F de Fisher revelou que o modelo foi estatisticamente significativo e preditivo com um erro experimental inferior a 1 %.

No diagrama de Pareto (Fig. 6), são mostradas as contribuições dos termos do modelo estatístico de previsão, dentro dos intervalos de condições de valores adotados para os fatores do DCCR adotado. A partir desse gráfico observa-se que todos os termos do modelo de previsão para a eficiência de separação nas câmaras de FAD são estatisticamente, significativos. Pode-se destacar, contudo, que existe uma maior contribuição dos termos envolvendo a pressão de trabalho. Percebe-se ainda que a interação entre os fatores mostrou-se pouco significativa, de modo a se poder variar qualquer um deles para se obter um efeito desejado sem interferência na contribuição do outro fator.

O melhor modelo de ajuste foi determinada por meio de regressão linear múltipla, com eliminação retrógrada. Finalmente, o modelo modificado cúbico polinomial com "modelo p-valor" muito pequenas ($<0,02$) a partir da análise de variância - ANOVA (Tabela 3) e um coeficiente adequado de determinação ($R^2 = 0,97$) e o coeficiente de determinação ajustado ($R_{\text{adjusted}} = 0,94$), foi altamente significativa para representar as relações efetivas entre a resposta e as variáveis significativas (equação 1).

$$Y = -253 + 242 \cdot X_1 - 110 \cdot X_1^2 + 138 \cdot X_2 - 19 \cdot X_2^2 - 5 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (1)$$

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Como um maior número de microbolhas resulta em um maior número de flocos, isto é, as gotículas de óleo envolvido, a eficiência da produção de microbolhas foi associada com a eficiência de separação de óleo em água. A interação dos parâmetros e o valor ótimo de cada uma das variáveis está claramente representada no gráfico tridimensional de superfície de resposta. A Figura 7 representa o gráfico tridimensional em função da relação entre o escoamento de ar/água para a produção de microbolhas e o medidor de pressão no tubo de descarga da bomba de microbolhas. A produção de microbolhas máxima, associado neste trabalho para a máxima eficiência de separação foi obtida no $0,8 \times 10^3$ para a relação de escoamento de ar/água e uma pressão de 4,5 bar. Além disso o aumento ou diminuição nestes parâmetros levou à redução nas respostas. Por outro lado, embora a maior proporção de escoamento de ar/água pode provocar o fenômeno de cavitação.

4. Conclusões

A utilização de uma bomba centrífuga, com a entrada controlada de ar para dentro do tubo de sucção provou ser uma estratégia eficaz para a produção de microbolhas utilizando ar atmosférico. Este estudo foi um bom exemplo para apoiar a presente inferência. A produção de microbolhas é o resultado de uma combinação sinérgica de interações de eficazes parâmetros que estão em equilíbrio. A conquista de uma máxima eficiência possível na separação água-óleo é necessária para obter uma máxima produção de microbolhas.

O sucesso do método de produção de microbolhas descrito neste trabalho constitui uma melhoria na flotação por ar dissolvido. Este método de separação gravitacional pode ser expresso pelo método FAD modificado e é vantajoso tanto em termos técnicos (redução nas peças de equipamentos necessários) e termos econômicos (redução em equipamentos e custos de energia). Futuros estudos devem ser realizados com este método usando

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

substâncias auxiliares de floculação (surfactantes) e sua aplicação em diferentes processos de separação, tais como flutuação coluna, lagoas de estabilização, *wetlands* construídos, etc.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Nacional Agência de Energia Elétrica (Aneel) e Empresa Termoeletrica de Pernambuco (Termope), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Ensino Superior (CAPES). Os autores agradecem aos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco e ao Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI), Brasil.

REFERÊNCIAS

AHMADUN, F. R.; PENDASHTEH, A.; ABDULLAH, L. C.; BIAK, D. R. A.; MADAENI, S. S.; ABIDIN, Z. Z. Review of technology for oil and gas produced water treatment. **J. Hazard. Mater.**, 170:2-3: 530-551, 2009. Doi: 10.1016/j.jhmat.2009.05.044.

BUTLER, E., HUNG, Y-T., YEH, R. Y-L., AL AHMAD, M. S. Electrocoagulation in Wastewater Treatment. **Water**, 3: 495-525, 2011.

CHERYAN, M., RAJAGOPALAN, N. Membrane processing of oily streams: wastewater treatment and waste reduction. **J. Membrane Sci.**, 151:13-18, 1998.

CONAMA – **Conselho nacional do meio ambiente**. Resolução 357/05, 2005.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

DAIMINGER, U., NITSCH, W., PLUCINSKI, P., HOFFMANN, S. A novel techniques for oil/water separation. **J. Membr. Sci.**, 99:197-203, 1995.

HONGXIANG, X.; JIONGTIAN, L.; YONGTIAN, W.; GAN, C.; XIAOWEI, D.; XIAOBING, L. Oil removing efficiency in oil-water separation flotation column. **Desalin. Water Treat.**, 53: 9: 2456-2463, 2015. DOI: 10.1080/19443994.2014.908413

KNOW, G., KOTA, A.K., LI, Y., SOHANI, A., MABRY, J.M., TUTEJA, A. On demand separation of oil-water mixtures. **Adv. Mater.**, 24:3666-3671, 2012.

KNOWTON, T. M. Tools and techniques for diagnosing and solving operating problems in fluidized bed systems. **Oil & Gas Science and Technology**, Rev. IFP 55: 209-217, 2000.

KURNIAWATI, H. A.; ISMADJI, S.; LIU, J. C. Microalgae harvesting by flotation using natural saponin and chitosan. **Bioresource Technol.**, 166: 429-434, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.079

MATIS, K. A.; PELEKA, E. N. Alternative flotation techniques for wastewater treatment: focus on electroflotation. **Separ. Sci. Technol.**, 45: 2465-2474, 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** 6th edition. John Wiley & Sons, Inc. 656 p., 2005. ISBN: 0471661597

MYERS, R. M.; MONTGOMERY, C. D.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments.** 3th edition, John Wiley & Sons, 704 p., 2009. ISBN: 978-0-470-17446-3

VASCONCELOS, R. S.; HENAUTH, R. C. S.; MOURA, A. E.; SANTOS, V. A.; SARUBBO, L. A. Strategy for a scale-up correlation in a dissolved air flotation

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

chamber. **Chem. Eng. Technol.**, 38: 5: 813-818, 2015. DOI: 10.1002/ceat.201400665.

RENNOLA, L.; SALAZAR, F.; CÁRDENAS, A.; BULLÓN, J.; GONZÁLEZ, L. Crude oil/water emulsions filtration with polymeric membranes. Interfacial interactions influence. **Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia.**, 30:410-418, 2007.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Miner. Eng.**, 15:139-155, 2002. ISSN: 0892-6875.

RUZICKA, M. C.; BUNGANIC, R.; DRAHOS, J. Meniscus dynamics in bubble formation. Part I: Experiment. **Chem. Eng. Res. Des.**, 87: 10: 1349-1356, 2009. DOI: 10.1016/j.cherd.2009.03.001

SADATOMI, M.; HAWAHARA, A.; FUKAMACHI, K.; MATSUYAMA, F.; TANAKA, N. Development of a new large-flow-rate and efficient mist generator, and its application to air cooling in greenhouses. **Multiphase Sci. Technol.**, 2010, 22:1: 79-93, 2010. DOI: 10.1615/MultScienTechn.v22.i1.50

SANTANDER, M.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water. **Separ. Coll. Surf. A**, 375: 237-244, 2011.

SILVA, F. C. P. R. E., SILVA, N. M. P. R., MOURA, A. E., ALMEIDA, R. G., LUNA, J. M., RUFINO, R. D., SANTOS, V. A., SARUBBO, L. A. Effect of biosurfactant addition in a pilot scale dissolved air flotation system. **Separ. Sci. Technol.**, 2014.

SILVA, R. C. F. S., ALMEIDA, D. G., RUFINO, R. D., LUNA, J. M., SANTOS, V. A., SARUBBO, L. A. Applications of Biosurfactants in the Petroleum Industry and the Remediation of Oil Spills. **Int. J. Mol. Sci.** (Online), 15: 12523-12542, 2014. ISSN: 1422-0067

SILVA, R. C. F. S., ALMEIDA, D. G., RUFINO, R. D., LUNA, J. M., SANTOS, V. A., SARUBBO, L. A. Applications of biosurfactants in the petroleum industry

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

and the remediation of oil spills. **Int. J. Mol. Sci.**, 15: 7: 12523-12542, 2014.
DOI: 10.3390/ijms150712523

SUN, L. Y., LI, Q. Y., HUA, Q., TIAN, Y. Application of image enhancement technology in bubble dimension measurement of deinked pulp flotation column. **Adv. Mater. Res.**, 510, 484-489, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.510.484

XU, H. X., LIU, J. T., GAO, L. H., WANG, Y. T., DENG, X. W., LI, X. B. Study of oil removal kinetics using cyclone-static microbubble flotation column. **Separ. Sci. Technol.**, 49:1170-1177, 2014.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

TABELA 1

Faixa dos valores reais e codificados utilizados para o DCCR

	Padrão				
Fatores	-1.41	-1.0	0	+1.0	+1.41
X_1 (1×10^3)	0.2	0.4	0.8	1.2	1.4
X_2 (bar)	2.1	2.5	3.5	4.5	4.9

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

TABELA 2

DCCR com variáveis independentes em valores reais

Experimento	Valores reais		
	X ₁	X ₂	Y
	(-)	(bar)	(%)
1	-1 (0.4x10 ³)	-1 (2.5)	44.00
2	1 (1.2 x10 ³)	-1 (2.5)	88.00
3	-1 (0.4 x10 ³)	1 (4.5)	45.00
4	1 (1.2 x10 ³)	1 (4.5)	80.00
5	0 (0.8 x10 ³)	-1.414 (2.1)	62.00
6	0 (0.8 x10 ³)	1.414 (4.9)	45.00
7	-1.41 (0.23 x10 ³)	0 (3.5)	33.00
8	1.41 (1.36 x10 ³)	0 (3.5)	82.00
9	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	96.00
10	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	98.00
11	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	98.00
12	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	97.00

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

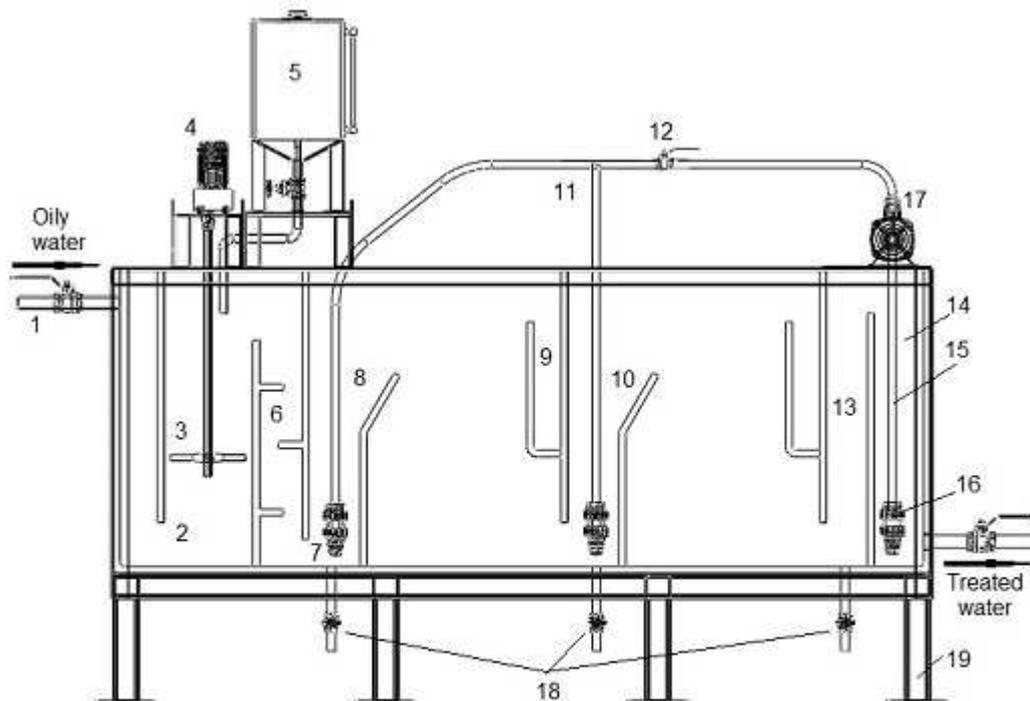
TABELA 3

Análise de variância (ANOVA)*

Fatores	SS	df	MS	F	P
X_1 (1×10^3) (L)	2748.980	1	2748.980	2998.887	0.000013
X_1 (1×10^3) (Q)	2002.225	1	2002.225	2184.245	0.000022
(2) X_2 (bar) (L)	120.448	1	120.448	131.398	0.001425
X_2 (bar) (Q)	2480.625	1	2480.625	2706.136	0.000016
X_1X_2	20.250	1	20.250	22.091	0.018220
Erro experimental	202.197	3	67.066	73.163	0.002647
Erro puro	2.750	3	0.917		
Total SS	6834.667	11			

* Nível de confiança de 95 %

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**



- 1 - Entrance; 2 - Mixing chamber inlet; 3 - Stirrer; 4 - Agitator motor; 5 - Surfactant tank; 6 - Static mixer; 7 - Microbubbles diffuser; 8 - Flotation chamber 1; 9 - Collector oily foam; 10 - Flotation chamber 2; 11 - Microbubbles tubes; 12 - Flow control valve; 13 - Treated water separator; 14 - Treated water chamber; 15 - Suction pipe; 16 - Check valve; 17 - Microbubbles pump; 18 - Drain valves; 19 - metal structure.

Figura 1 - Instalação experimental do protótipo FAD utilizado para a produção de testes de microbolhas

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

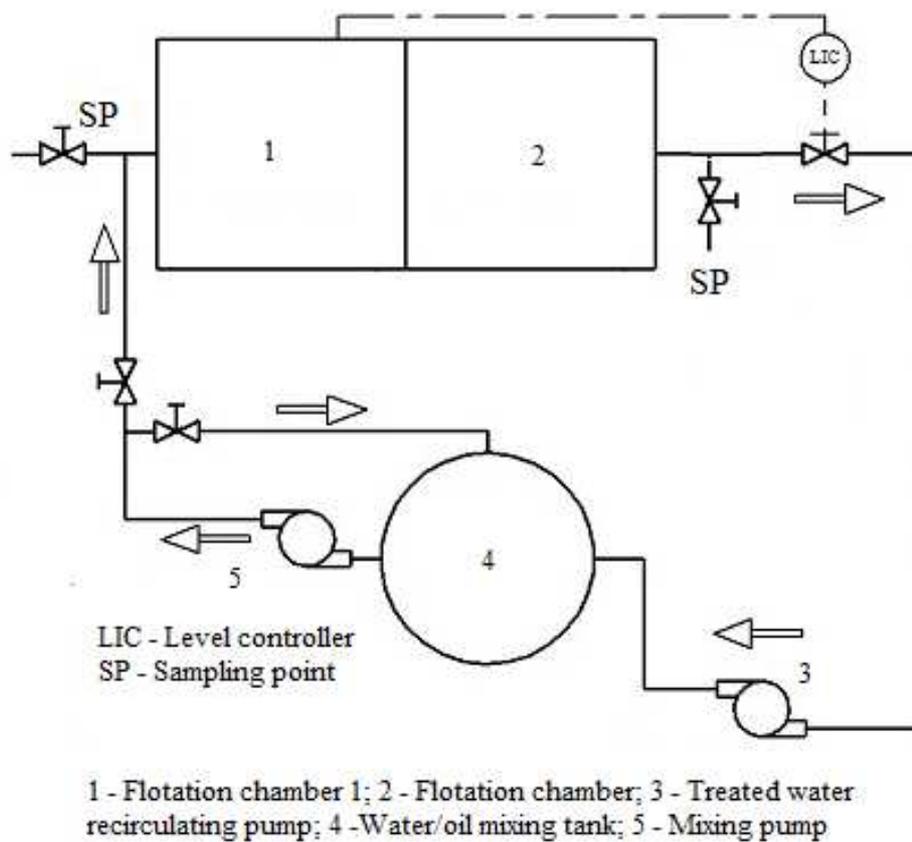
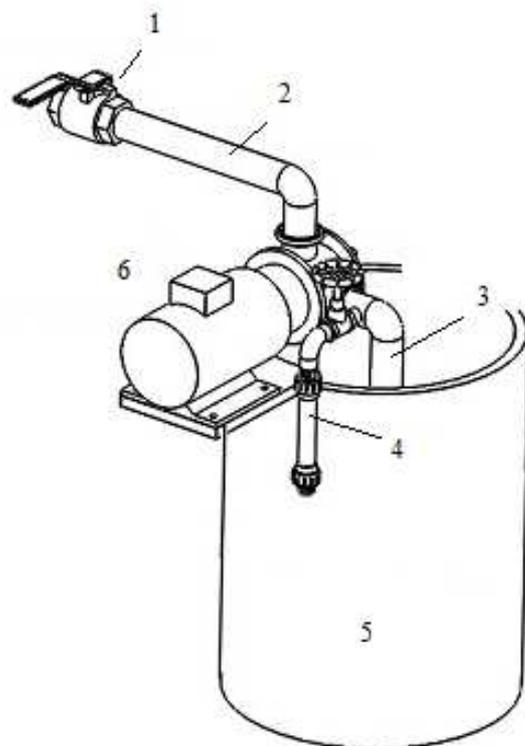


Figura 2 - Fluxograma de componentes utilizados para reutilizar a água tratada e a produção de efluentes sintético

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**



1 - Pressure setting valve; 2 - Discharg pipe; 3 - Suction pipe;
4 - Rotameter; 5 - Suction reservoir; 6 - Pump-motor assembly

Figura 3 - Instalação experimental para a produção de microbolhas

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

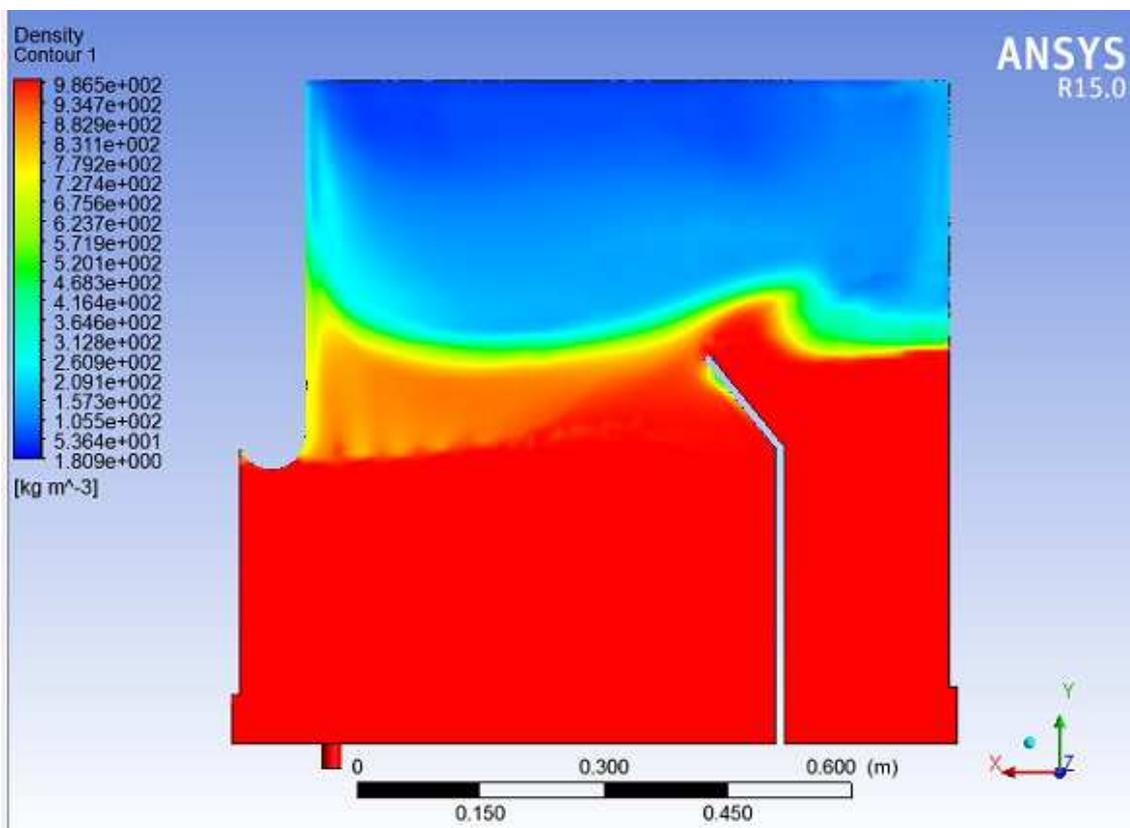


Figura 4 - Distribuição de microbolhas em uma câmara de FAD obtidos por simulação CFD

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**



Figura 5 - Fotografia que mostra a distribuição de microbolhas numa câmara de flotação no protótipo FAD

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

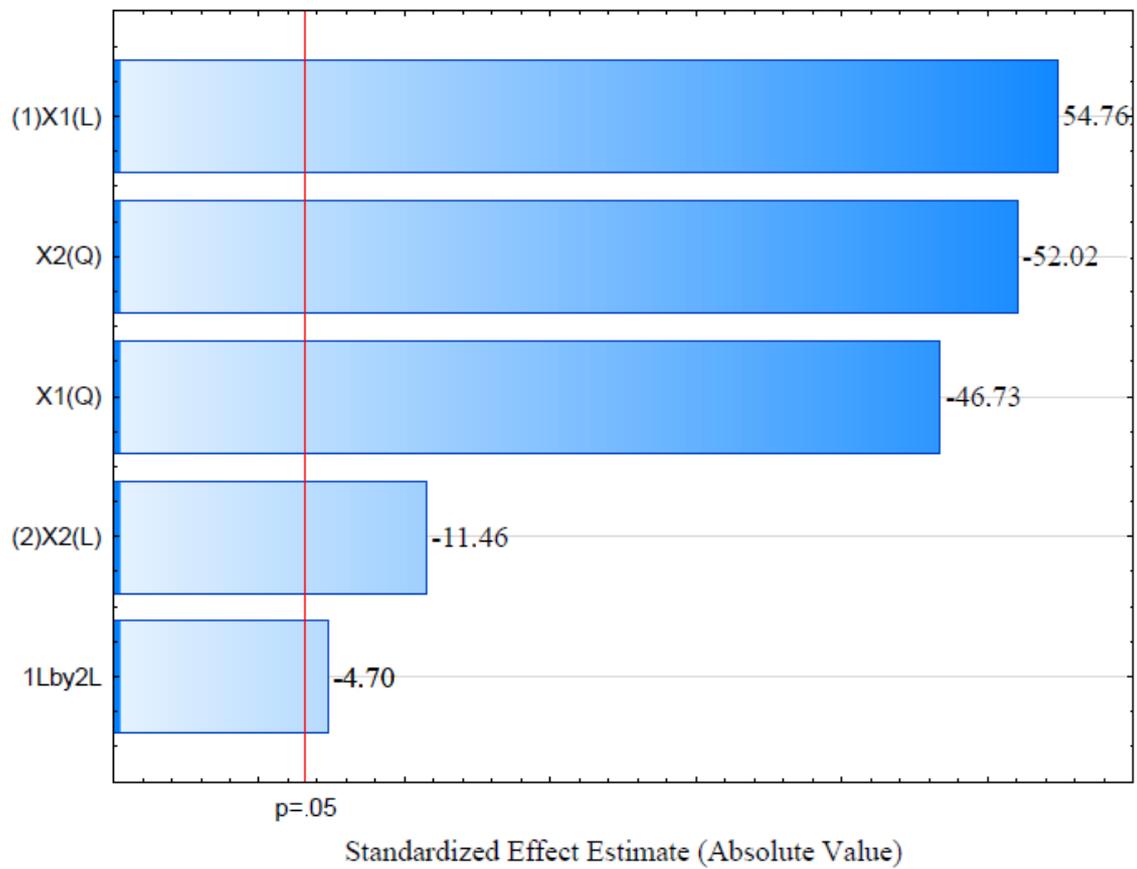


Figura 6 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados de eficiência de separação

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

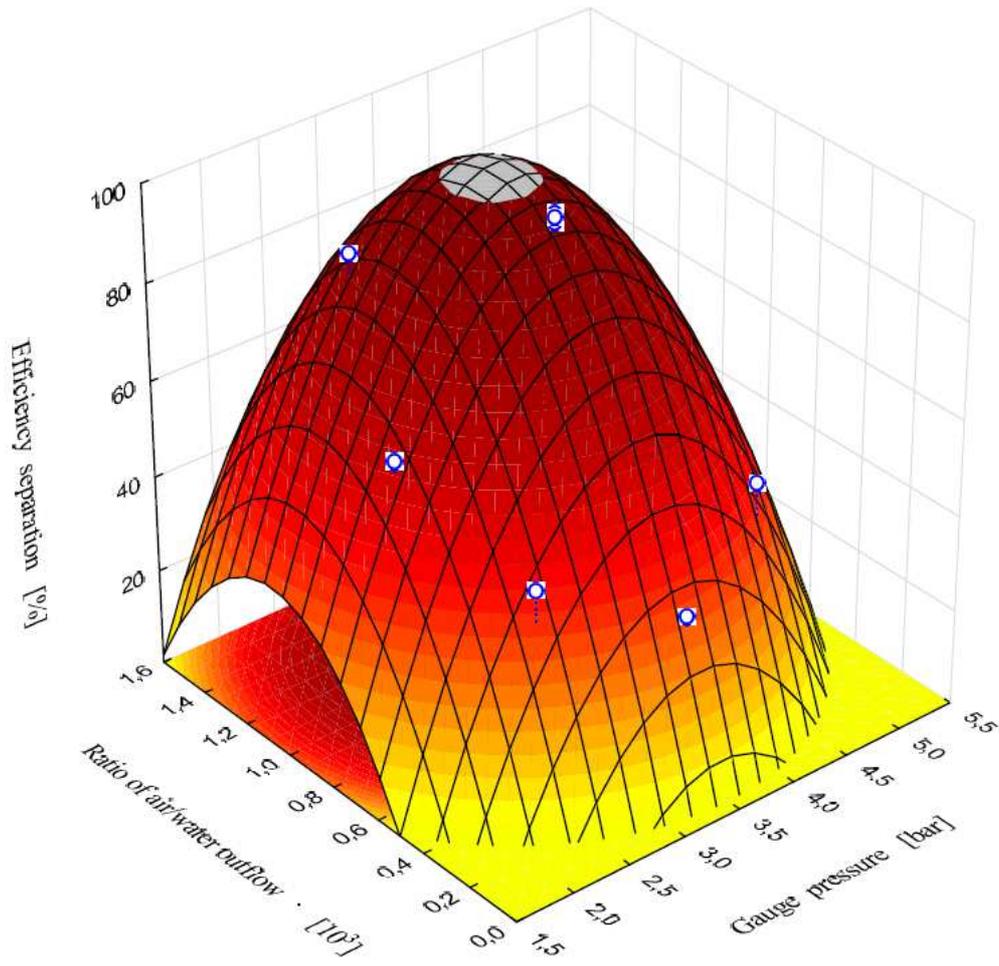


Figura 7 - Superfície de resposta da eficiência de separação em função da razão / taxa de fluxo de água do ar e manômetro

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

CAPÍTULO 3

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir que:

- A inovação proposta para a produção de microbolhas, quando testada em um protótipo piloto de flotação por ar dissolvido (FAD), foi aprovada pela sua maior eficiência de separação em relação ao método convencional, cujos resultados podem ser comprovados na literatura.
- Essa técnica de produção de microbolhas é simples, uma vez que utiliza apenas uma bomba centrífuga convencional.
- O planejamento experimental do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) mostrou-se como uma importante ferramenta de análise de condições operacionais para esse tipo de fenômeno.
- A técnica mostrou-se vantajosa em comparação aos processos convencionais de saturação da água a ser tratada com ar comprimido, pela redução de equipamentos e custos com energia.
- Esse tipo de mecanismo possibilitou uma melhora significativa no processo de separação de FAD, que caberia para esta nova associação de técnicas a denominação de FAD Modificada (FADM).
- Sugere-se para futuros trabalhos estudos de aplicação dessa técnica, associados a substâncias auxiliares de floculação (surfactantes). Sugere-se ainda sua aplicação em vários tipos de processos de separação, incluindo flotação em coluna, lagoas de estabilização, *wetland* construído, entre outros.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

ANEXOS

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Microbubbles Generation with Aid of a Centrifugal Pump

Rosangela Cristine da Silva Henauth^{1,4}, Robson de Souza Vasconcelos^{1,4}, Alex Elton de Moura^{2,4}, Leonie Asfora Sarubbo^{3,4}, Valdemir Alexandre Santos^{3,4}

¹Post-Graduate Program in Development of Environmental Processes, Catholic University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

²Centre of Technology and Geoscience, Federal University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

³Centre of Science and Technology, Catholic University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

⁴Centre for Management of Technology and Innovation, Recife, Pernambuco, Brazil

Correspondence: Leonie Asfora Sarubbo (leonie@unicap.br), Centre of Science and Technology, Catholic University of Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brazil.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Abstract

For saturation of the treated water with atmospheric air in a dissolved air flotation (DAF) system and production of microbubbles, the air was introduced through the suction pipe of a centrifugal pump. The operating conditions of the centrifugal pump were adjusted to avoid the occurrence of cavitation phenomena. The novel technique was applied for the treatment of oily water in a DAF pilot prototype. A central composite rotational design (CCRD) was used to determine the efficiency of the separation process. Separation efficiency was about 97 %. In addition this high degree of oil-water separation, the technique reduces the space and energy cost in comparison to the conventional processes of saturation of the effluent treated with compressed air.

Keywords: Microbubbles, Centrifugal pump, CCRD, Oily wastewater, Wastewater treatment

1 Introduction

With the increasingly rigorous demands of environmental agencies, the treatment of oily water effluents from a wide variety of industrial activities and services constitutes a major challenge. To comply with environmental legislation, however, simply removing the free-floating oil is not enough. It is also necessary to remove nearly the entirety of the oil present in the form of emulsion [1]. Effluents from thermal electrical plants, sugar and alcohol processing plants, petrochemical, paint, metal, mining, cold storage and dairy industries require this type of oily water treatment [2, 3].

Shearing caused by pumps, valves, hydraulic constriction and other equipment disperse oil in water, thereby forming an emulsion that can be highly stabilized by the

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

presence of finely divided solids, natural surfactant substances from petroleum and other reagents added during the production of lubricating and combustible oils [4]. Discarding or reusing oil-in-water emulsion is only permitted after the removal of the oil and suspended solids to acceptable levels. In Brazil, the concentration of oil in effluents discarded by oil rigs should not exceed 20 mg/L [5].

The literature offers a number of studies involving the separation of oil-in-water emulsions [4]. Such methods include ultrafiltration, microfiltration, separation by gravity, dissolved air flotation (DAF), column flotation, electroflotation, induced air flotation, the use of a membrane bioreactor, carbon adsorption, chemical coagulation and electrocoagulation [1, 6]. In recent decades, DAF has been widely applied in the treatment of oily water [7]. Small gas bubbles are used in many environmental and industrial processes for solid-liquid and liquid-liquid separations [8]. The collision between the microbubbles and particles forms low-density clusters that rise to the surface of the liquid to form a floating layer of foam that can subsequently be removed either mechanically or hydraulically [9, 10]. Indeed, industrial processes involving gas bubbles in liquids have a large variety of applications and research in this field has advanced at a surprising rate [11, 12].

Despite the effectiveness of DAF in the water-oil separation process, the production of microbubbles is costly [13], as the use of compressors and pressurized tanks or the use of multiphase pumps for the production of saturated effluence involves a considerable expenditure of energy [14]. Thus, more compact, economical equipment are needed. This paper describes the development of a microbubble production method that can be used to replace costly conventional methods [15].

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

2 Material and Methods

2.1 Experimental set up

The DAF prototype was constructed for the treatment of oily water in a continuous regimen [15]. It has two flotation chambers arranged side by side, with capacity to treat one m³ of oily water per hour and allows the recirculation of an equal volume of treated water per hour for the production of microbubbles. The prototype was constructed in transparent acrylic to allowed the visualization of the distribution of the microbubbles (Fig. 1) during the tests.

(Figure 1)

The flotation process can be initiated in two antechambers, which can be used for addition of destabilizing substances of water-oil emulsions. In the first antechamber, a surfactant can be added with the aid of a mechanical agitator. In the second antechamber, a static mixer completes the homogenization. The liquid to be treated then enters the first DAF chamber and interacts with a flow of microbubbles, distributed homogeneously through the entire transverse section of this entrance chamber.

The flocs resulting from the adherence of microbubbles to oil particles float due to the difference in density from that of the medium. This oily foam is pushed by the flow movement through the flotation chambers into a collector positioned at the upper extremity of each chamber and removed. The treated water exits through the lower part of the first chamber and immediately enters into contact with a second flow of

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

microbubbles, repeating the flotation sequence in the next chamber.

The synthetic wastewaters used in the experiments were prepared with aid of the flow rates of feed water and lubricating oil inlet the prototype. Motor oil was selected as contaminant oil that is commercially available for use in flex engines (gasoline, VNG and alcohol), type SAE 20W-50, with synthetic guard (PETROBRAS). It consists of a paraffinic base lubricating oil (a complex mixture of hydrocarbons) and performance enhancing additives.

An effluent with a known concentration was needed to feed the DAF prototype. For such, it was necessary to re-circulate the treated water with a pump to a water-oil mixture tank (Fig. 2). Connected to this tank, a mixing pump maintained part of the water re-circulating to the tank, forcing close contact between the water and the oil layer on the surface of the mixture. The complementary part of the oily water flow fed the DAF prototype this synthetic effluent. This strategy allowed constant oil content of 125 mg/L of water.

(Figure 2)

The mechanism for the production of microbubbles involves the entrance of air controlled by a rotameter in the suction pipe of a centrifugal pump (Fig. 3). The pump selected for this application was rated for 60 meter water column (m. w. c.) of head at the design flow rate and a 2.0 hp motor, even though the piping circuit it served was very short with very few fittings. This pump is installed above the surface of the liquid to ensure negative pressure at the entrance of the pump. Atmospheric air blends with the water being pumped in both the interior of the equipment and along the discharge pipe.

HENAUTH, R. C. S. Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).

A valve at the end of the discharge pipe is set to produce pressure between 1.5 and 5.5 bar, which is monitored using a Bourdon pressure gauge. Pressuring the discharge pipe is essential to the production of microbubbles. However, the excessive entrance of air to the pump should be avoided, as this can reduce the efficiency of the system due to the build-up of air in the interior and the pump will stop transporting water due to the cavitation phenomenon.

(Figure 3)

The distribution of microbubbles was estimated with the aid of the CFD ANSYS® program (Fig. 4). A submerged camera (SONY, model DSC-TS1) was used to register the distribution of microbubbles in the flotation chamber of the DAF prototype (Fig. 5). The predicted distribution was confirmed by the photo documentation, demonstrating water flow without microbubbles in the lower portion of the end of the flotation chamber, where the liquid was introduced for further flotation in the second chamber or discard or re-circulation of the treated water [16].

(Figure 4/Figure 5)

The microbubbles attach to the oil droplets, forming a larger, lighter structure that rises to the surface of the flotation chamber. The efficiency of these flocs formation is directly proportional to the intensity of microbubbles flow [17, 18]. In the present study, the microbubble production efficiency and water-oil separation efficiency were correlated through visual observations and quantitative analysis of the microbubble

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

production conditions.

2.2 Methodology

Response surface method (RSM) offers a large amount of information from a small number of experiments because of using special designs those help the appropriate model be fitted to the response(s) [19]. A central composite rotatable design (CCRD) is the most popular RSM design, for the experiments due to its obvious advantages of rotability and the ability to analyse the interaction effects. Includes three groups of design points. Factorial points that consists of all possible combinations of the +1 and -1 levels of the factors; axial points that have all of the factors set to 0, the midpoint, except one factor, which has the value +/- Alpha; and center points, which are points with all levels set to coded level 0, the midpoint of each factor range. The center point of the design is repeated four or more times to get a good estimate of experimental error (pure error variance). According to [20] this gives an adequate estimate of the variation of the response and provides the number of degrees of freedom needed for an adequate statistical test of the model. Furthermore, a central composite rotatable designs requires 5 levels of each factor: -Alpha, -1, 0, 1, and +Alpha. Rotatable designs provide the desirable property of constant prediction variance at all points that are equidistant from the design center, thus improving the quality of the prediction.

A 2^2 central composite rotational design (CCRD) was employed using the ratio between the air/water outflow for microbubble production (X_1) and the pressure in the discharge pipe of the microbubble pump (X_2) as the independent variables. Table 1 displays the real and coded range of values used in the assays. The experiments required a total of 12 runs: four complete factor points, four central points and four axial points.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

(Table 1)

3 Results and Discussion

The experimental designs and results analysis were carried out using the software Statistica 10.0 (Statsoft Inc., USA) according to the significance level established to obtain the mathematical model. The significance of the regression coefficients and the associated probabilities, $p(t)$, were determined by Student's t test; the model equation significance was determined by Fisher's F test. The variance explained by the model is given by the multiple determination coefficients, R^2 .

The water-oil separation efficiency of the DAF prototype was the response variable in the CCRD. Table 2 displays the values for each experiment. The following observations were made regarding the operational conditions of the process:

(Table 2)

- Intermediate values for the independent variables led to maximum separation efficiency (oil-in-water), indicating the correct ranges for these variables and working conditions;
- The maximum value of the obtained separation efficiency corresponds oil recovery levels with the aid of destabilizing substances of the type surfactants or biosurfactants [16, 21, 22].
- Minimum values led to minimum separation efficiency, likely due to the increase in

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

microbubble size and low quality of air for the microbubble formation;

- Maximum pressure with an intermediate air and water flow rate ratio for microbubble production led to a low degree of efficiency, likely due to the reduction in water flow due to the small opening of the pressure control valve;

- A maximum air and water flow rate ratio for microbubble production with intermediate pressure led to considerable, but not maximum efficiency, likely due to the excessive quantity of the microbubble formation components for adequate opening of the pressure control valve.

Table 3 displays the results of the analysis of variance (ANOVA) for the acquisition of a prediction model with a 95 % confidence interval. The correlation between the experimental data and values predicted by the model was satisfactory ($R^2 = 97 \%$). Moreover, Fisher's F test revealed that the model was statistically significant, predictive and an experimental error of less than 1%.

(Table 3)

The Pareto Chart (Fig. 6) shows the contributions of the terms of the statistical prediction model within the ranges adopted for the factors of the CCRD. All terms of the prediction model for separation efficiency in the DAF chambers were statistically significant. The terms involving the ratio between the flow of air / water showed the greatest contribution. The interaction among the factors had a low degree of significance. Thus, any individual factor could be varied to obtain a given effect without affecting the contribution of another factor.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

(Figure 6)

The best fitting model was determined through multiple linear regressions with backward elimination. Finally, the modified cubic polynomial model with very small "model p-values" (< 0.02) from the analysis of ANOVA (Table 3) and a suitable coefficient of determination ($R^2 = 0.97$) and adjusted coefficient of determination ($R_{\text{adjusted}} = 0.94$), was highly significant to represent the actual relationships between the response and the significant variables (Equation 1).

$$Y = -253 + 242 \cdot X_1 - 110 \cdot X_1^2 + 138 \cdot X_2 - 19 \cdot X_2^2 - 5 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (1)$$

As a larger number of microbubbles results in a larger number of flocs, that is, oil droplets enveloped, microbubble production efficiency was associated with water-oil separation efficiency. The interaction of the parameters and optimal value of each variable is clearly represented in the three dimensional response surface plot. Figure 7 represents a three dimensional plot as function of ratio between the air / water outflow for microbubble production and the gauge pressure in the discharge pipe of the microbubble pump. Maximum microbubble production, associated in this work to the maximum separation efficiency was obtained at the $0.8 \cdot 10^3$ for the air / water outflow ratio and a gauge pressure of 4.5 bar. Further increase or decrease in these parameters led to the decrease in the responses. On the other hand, though higher air / water outflow ratio can to causes the cavitation phenomenon.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

(Figure 7)

4 Conclusions

The use of a centrifuge pump with the controlled entrance of air into the suction pipe proved to be an efficient strategy for the production of microbubbles using atmospheric air. In this study was a good example to support the following inference. Microbubbles production is the result of a synergistic combination of effective parameters interactions and these parameters are in equilibrium. Achievement of maximum possible separation oil-water efficiency is necessary to obtain the maximum microbubbles production.

The successful microbubbles production method described in this paper constitutes an improvement in dissolved air flotation. This gravitational separation method can be denominated by modified DAF method and is advantageous in both technical terms (reduction in the pieces of equipment needed) and economic terms (reduction in equipment and energy costs). Future studies should be conducted with this method using auxiliary flocculation substances (surfactants) and its application in different separation processes, such as column flotation, stabilization lagoons, constructed wetlands, etc.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

The authors have declared no conflict of interest.

Symbols used

X_1 [-] Ratio of air and flow rates

X_2 [bar] Gauge pressure

Y [%] Efficiency separation

Abbreviations

CCRD - central composite rotational design

CFD - computational fluid dynamics

DAF - dissolved air flotation

RSM - response surface methods

m.w.c. - meter water column

hp - house power

Acknowledgments

Funding for this study was provided by the State of Pernambuco Foundation for the Assistance to Science and Technology (FACEPE), the Research and Development Program of the Brazilian National Electrical Energy Agency (ANEEL), the Pernambuco Thermoelectric Company (Termope), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and the Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES). The authors are grateful to the laboratories of the Centre for Science and Technology of the Catholic University of Pernambuco and the Centre for Technology and Innovation Management (CGTI), Brazil.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

References

- [1] F. R. Ahmadun, A. Pendashteh, L. C. Abdullah, D. R. A. Biak, S. S. Madaeni, Z. Z. Abidin, Review of technology for oil and gas produced water treatment. *J. Hazard. Mater.*, **2009**, 170 (2-3), 530-551. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.044
- [2] L. Rennola, F. Salazar, A. Cárdenas, J. Bullón, L. González, Crude oil/water emulsions filtration with polymeric membranes. Interfacial interactions influence. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia.*, **2007**, 30 (Especial), 410-418. ISSN: 0254-0770
- [3] U. Daiminger, W. Nitsch, P. Plucinski, S. Hoffmann, Novel techniques for oil/water separation. *J. Membr. Sci.*, **1995**, 99 (2), 197-203. DOI: 10.1016/0376-7388(94)00218-N
- [4] L. Y. Sun, Q. Y. Li, Q. Hua, Y. Tian, Application of image enhancement technology in bubble dimension measurement of deinked pulp flotation column. *Adv. Mater. Res.*, **2012**, 510, 484-489. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.510.484
- [5] Conama – Conselho nacional do meio ambiente, **2005**, Resolução 357/05, Brasil.
- [6] K. A. Matis, E. N. Peleka, Alternative flotation techniques for wastewater treatment: focus on electroflotation. *Separ. Sci. Technol.*, **2010**, 45 (16), 2465-2474. DOI: 10.1080/01496395.2010.508065

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

- [7] H. X. Xu, J. T. Liu, L. H. Gao, Y. T. Wang, X. W. Deng, X. B. Li, Study of oil removal kinetics using cyclone-static microbubble flotation column. *Separ. Sci. Technol.*, **2014**, 49 (8), 1170-1177. DOI: 10.1080/01496395.2014.881879
- [8] G. Kwon, A. K. Kota, Y. Li, A. Sohani, J. M. Mabry, A. Tuteja, On-demand separation of oil-water mixtures. *Adv. Mater.*, **2012**, 24 (27), 3666-3671. DOI: 10.1002/adma.201201364
- [9] M. Cheryan, N. Rajagopalan, Membrane processing of oily streams: wastewater treatment and waste reduction. *J. Membr. Sci.*, **1998**, 151 (1), 13-18. DOI: 10.1016/S0376-7388(98)00190-2
- [10] J. Rubio, M. L. Souza, R. W. Smith, Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Miner. Eng.*, **2002**, 15 (3), 139-155. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00216-3
- [11] M. Santander, R. T. Rodrigues, J. Rubio, Modified jet flotation in oil (petroleum) emulsion/water separations. *Coll. Sur. A.*, **2011**, 375 (1-3), 237-244. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.12.027
- [12] E. Butler, Y-T. Hung, R. Y-L. Yeh, M. S. Al Ahmad, Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, **2011**, 3, 495-525. DOI: 10.3390/w3020495
- [13] T. M. Knowton, Tools and techniques for diagnosing and solving operating problems in fluidized bed systems. *Oil & Gas Sci. Technol. Rev. IFP.*, **2000**, 55 (2), 209-217. DOI: 10.2516/ogst:2000013

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

- [14] M. Sadatomi, A. Kawahara, K. Fukamachi, Fuminori Matsuyama, Naoki Tanaka, Development of a new large-flow-rate and efficient mist generator, and its application to air cooling in greenhouses. *Multiphase Sci. Technol.*, 2010, 22 (1) 79-93. DOI: 10.1615/MultScienTechn.v22.i1.50
- [15] M. C. Ruzicka, R. Bunganic, J. Drahos, Meniscus dynamics in bubble formation. Part I: Experiment. *Chem. Eng. Res. Des.*, **2009**, 87 (10), 1349-1356. DOI: 10.1016/j.cherd.2009.03.001
- [16] F. C. P. R. E. Silva, N. M. P. R. Silva, A. E. Moura, R. G. Almeida, J. M. Luna, R. D. Rufino, V. A. Santos, L. A. Sarubbo, Effect of biosurfactant addition in a pilot scale dissolved air flotation system. *Separ. Sci. Technol.*, **2015**, 50 (4), 618-625. DOI: 10.1080/01496395.2014.957319
- [17] R. S. Vasconcelos, R. C. S. Henauth, A. E. Moura, V. A. Santos, L. A. Sarubbo, Strategy for a scale-up correlation in a dissolved air flotation chamber. *Chem. Eng. Technol.*, **2015**, 38 (5), 813-818. DOI: 10.1002/ceat.201400665
- [18] R. C. F. S. Silva, R. G. Almeida, R. D. Rufino, J. M. Luna, V. A. Santos, L. A. Sarubbo, Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. *Int. J. Mol. Sci.*, **2014**, 15 (7), 12523-12542. DOI: 10.3390/ijms150712523
- [19] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments. 6th edition. John Wiley & Sons, Inc., **2005**, 656 p. ISBN: 0471661597

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

- [20] R. M. Myers, C. D. Montgomery, C. M. Anderson-Cook, Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments. 3th edition, John Wiley & Sons, **2009**, 704 p. ISBN: 978-0-470-17446-3
- [21] H. A. Kurniawati, S. Ismadji, J. C. Liu, Microalgae harvesting by flotation using natural saponin and chitosan. *Bioresource Technol.*, **2014**, 166, 429-434. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.079
- [22] X. Hongxiang, L. Jiongtian, W. Yongtian, C. Gan, D. Xiaowei, L. Xiaobing, Oil removing efficiency in oil-water separation flotation column. *Desalin. Water Treat.*, **2015**, 53 (9), 2456-2463. DOI: 10.1080/19443994.2014.908413

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Table 1. Real and coded values (+ higher level, 0 intermediate, - lower level) for the independent variables in the CCRD (2^2) for separation efficiency oil-water

	Levels				
Factors	-1.41	-1.0	0	+1.0	+1.41
X_1 (1×10^3)	0.2	0.4	0.8	1.2	1.4
X_2 (bar)	2.1	2.5	3.5	4.5	4.9

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Table 2. Matrix of CCRD (2^2) with independent variables and response values for separation efficiency oil-water

Run	X ₁ (-)	X ₂ (bar)	Y (%)
1	-1 (0.4x10 ³)	-1 (2.5)	44.00
2	1 (1.2 x10 ³)	-1 (2.5)	88.00
3	-1 (0.4 x10 ³)	1 (4.5)	45.00
4	1 (1.2 x10 ³)	1 (4.5)	80.00
5	0 (0.8 x10 ³)	-1.414 (2.1)	62.00
6	0 (0.8 x10 ³)	1.414 (4.9)	45.00
7	-1.41 (0.23 x10 ³)	0 (3.5)	33.00
8	1.41 (1.36 x10 ³)	0 (3.5)	82.00
9	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	96.00
10	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	98.00
11	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	98.00
12	0 (0.8 x10 ³)	0 (3.5)	97.00

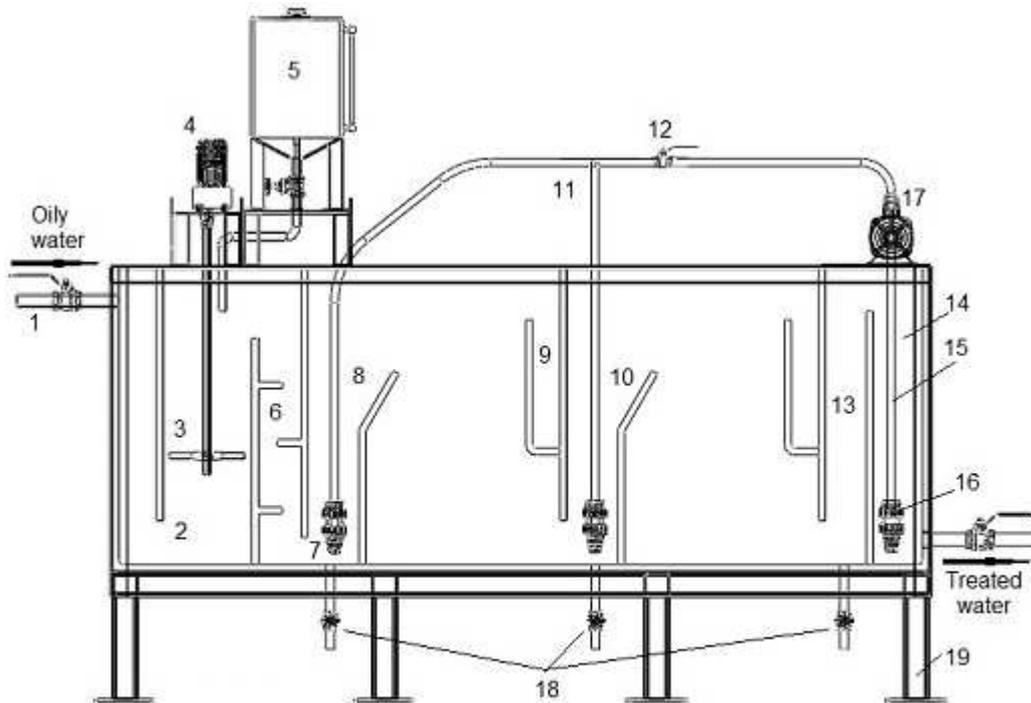
HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Table 3. Variance analysis for validation of mathematical models (ANOVA)*

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F _{calculated}	P-value
X ₁ (1x 10 ³) (L)	2748.980	1	2748.980	2998.887	0.000013
X ₁ (1x 10 ³) (Q)	2002.225	1	2002.225	2184.245	0.000022
(2) X ₂ (bar) (L)	120.448	1	120.448	131.398	0.001425
X ₂ (bar) (Q)	2480.625	1	2480.625	2706.136	0.000016
X ₁ X ₂	20.250	1	20.250	22.091	0.018220
Lack of fit	202.197	3	67.066	73.163	0.002647
Pure error	2.750	3	0.917		
Total SS	6834.667	11			

* Confidence level 95 %

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**



1 - Entrance; 2 - Mixing chamber inlet; 3 - Stirrer; 4 - Agitator motor; 5 - Surfactant tank; 6 - Static mixer; 7 - Microbubble diffuser; 8 - Flotation chamber 1; 9 - Oily foam collector; 10 - Flotation chamber 2; 11 - Microbubble tubes; 12 - Flow control valve; 13 - Treated water separator; 14 - Treated water chamber; 15 - Suction pipe; 16 - Check valve; 17 - Microbubble pump; 18 - Drain valves; 19 - Metal structure

Figure 1: Experimental setup of the DAF prototype utilized for microbubble generation with aid of a centrifugal pump

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

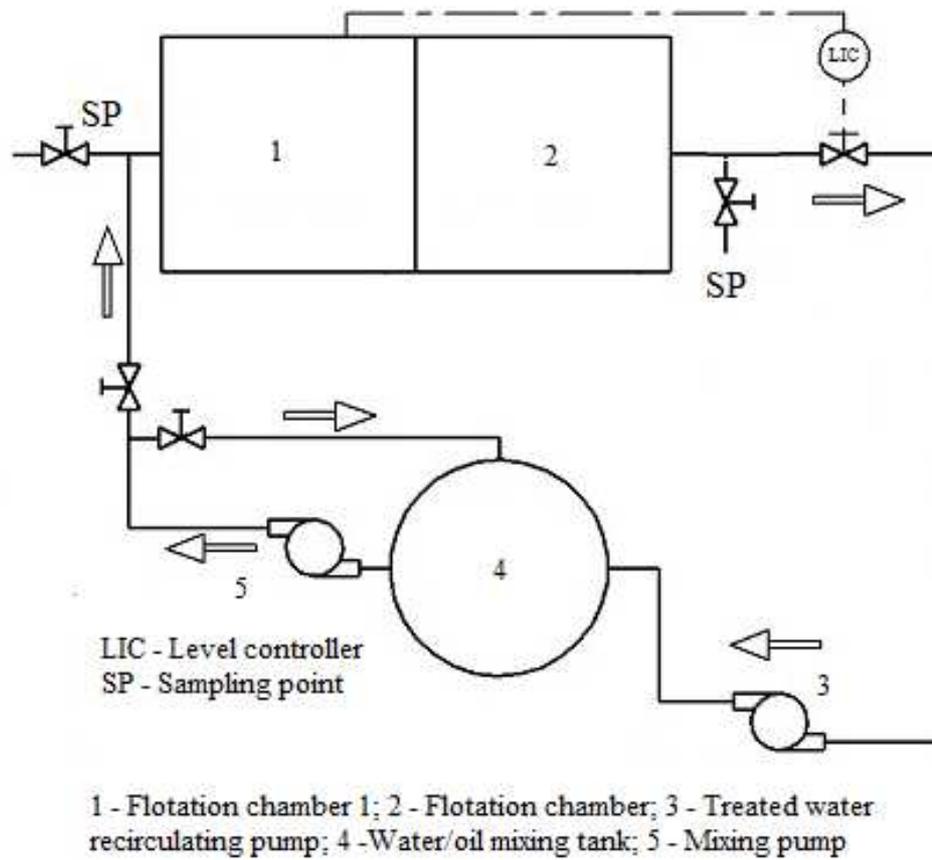


Figure 2: Flowchart of components for recirculating of treated water and production of synthetic effluent

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

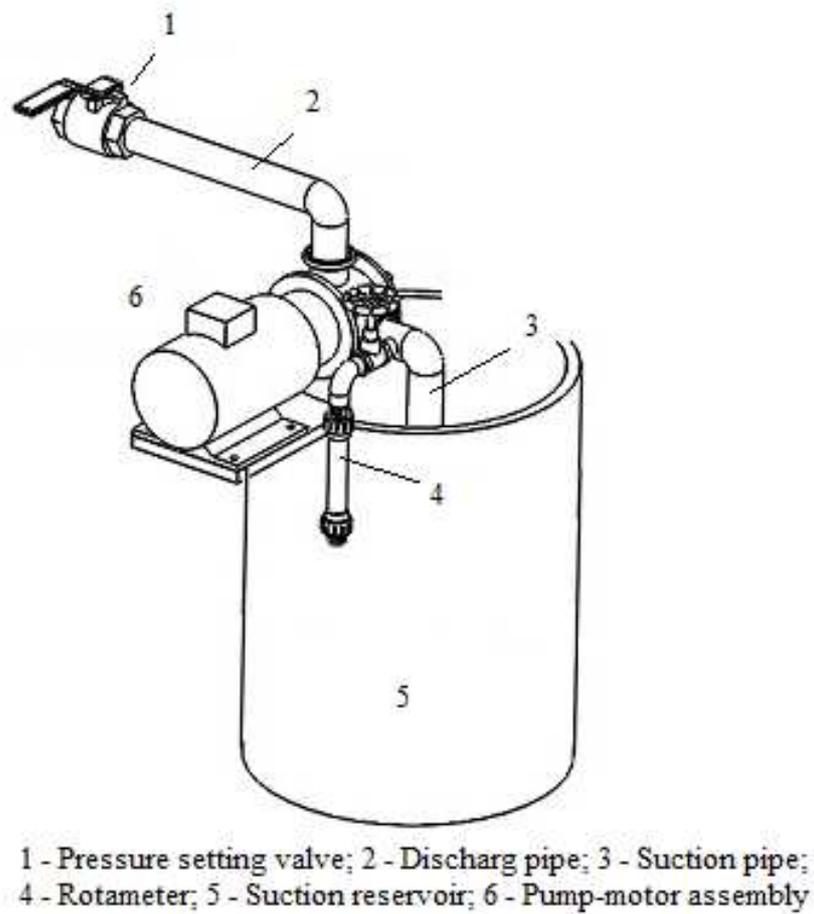


Figure 3: Experimental setup for microbubble production with aid of a centrifugal pump

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

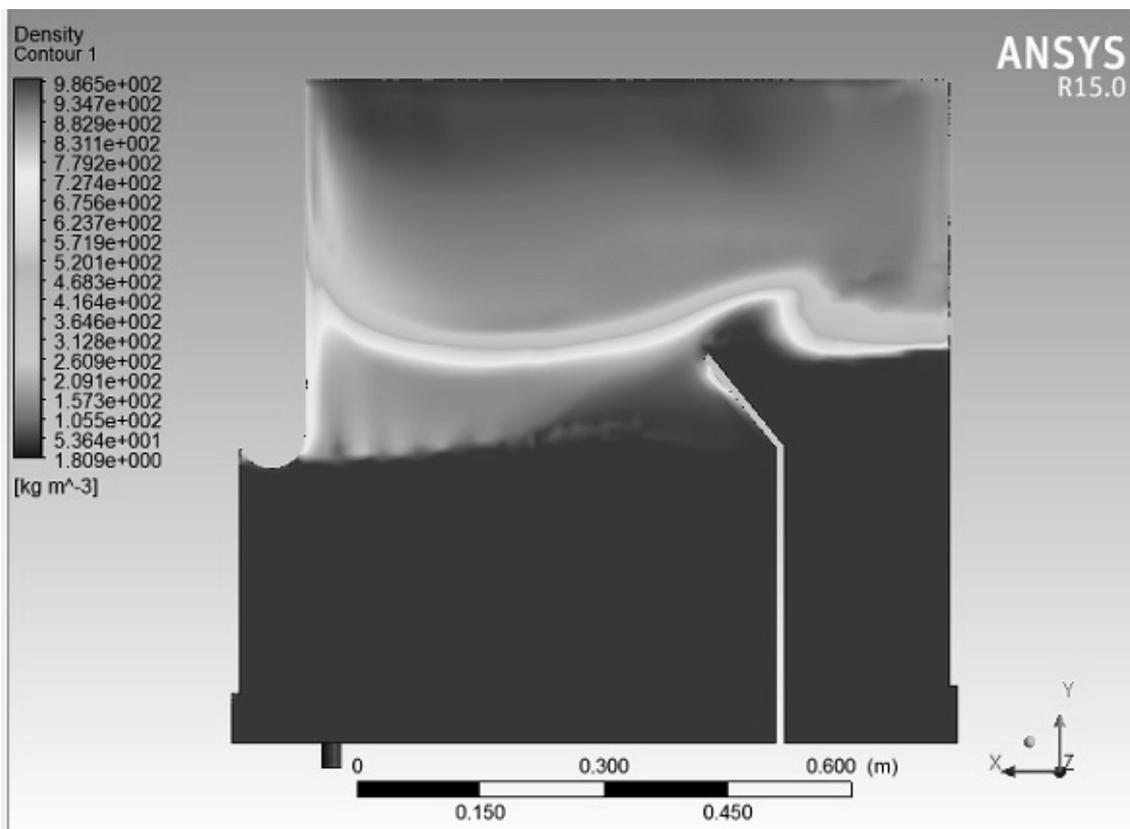


Figure 4: Microbubble distribution in the flotation chamber of the DAF prototype obtained through the simulation of computational fluid dynamics

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**



Figure 5: Photograph showing distribution of microbubbles in flotation chamber of DAF prototype

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

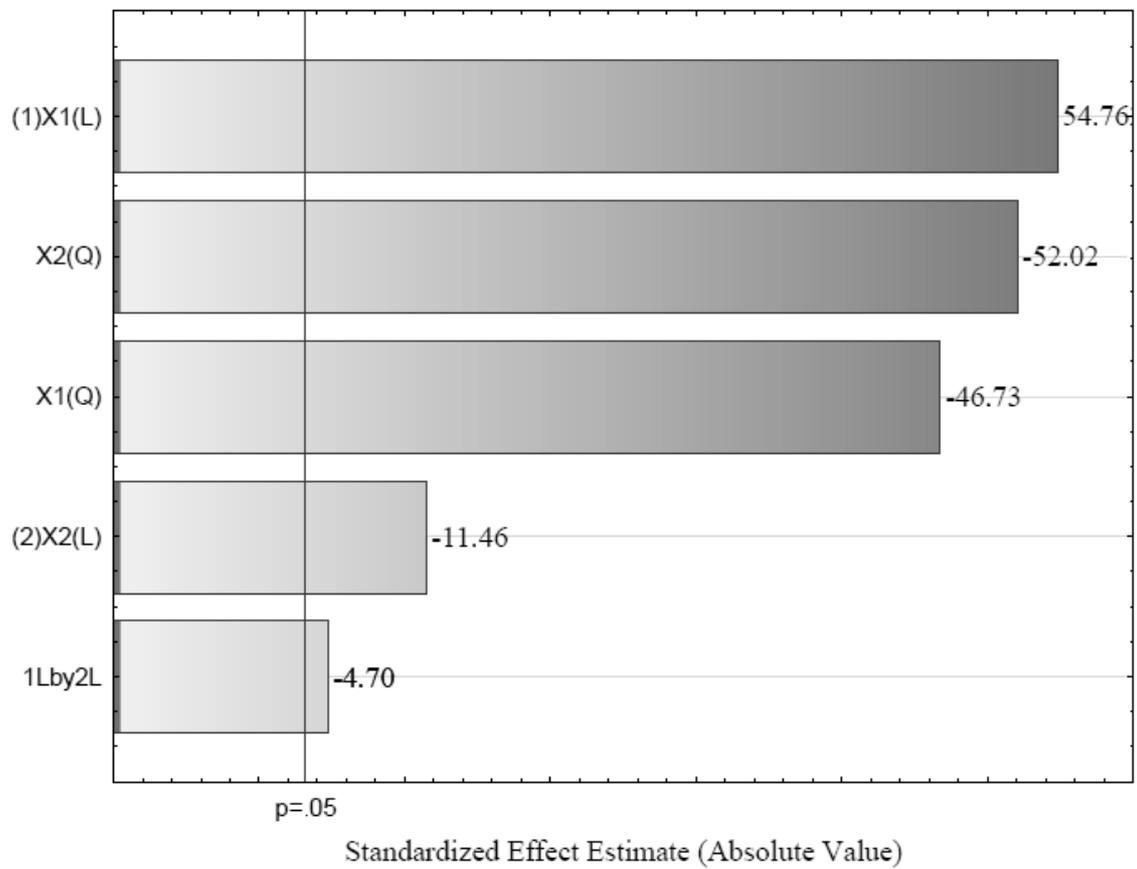


Figure 6: Pareto chart of CCRD performed showing the significance of the experimental variables: X_1 , ratio oil/water outflow; X_2 , gauge pressure in pump entrance; L, linear effect; and Q, quadratic effect

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

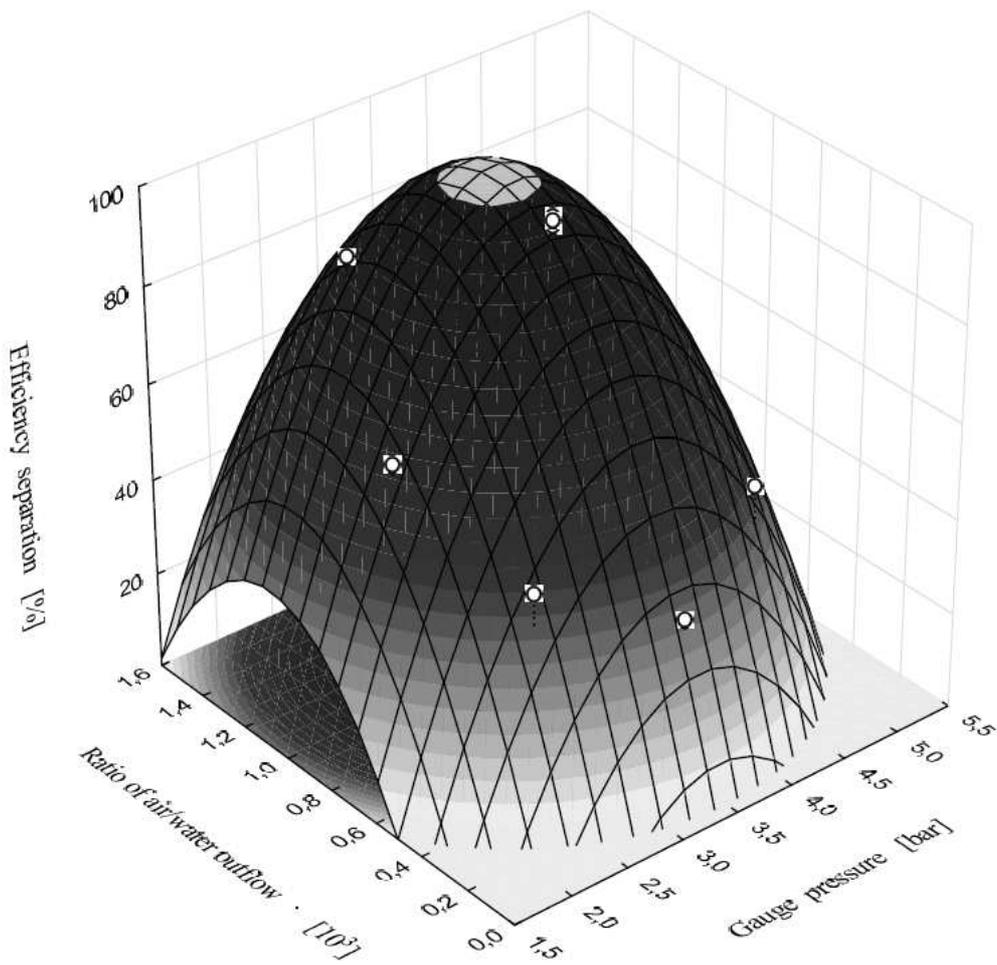


Figure 7: Response surface of separation efficiency in function of air / water flow rate ratio and gauge pressure

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

TABLE LEGENDS

Table 1. Real and coded values (+ higher level, 0 intermediate, - lower level) for the independent variables in the CCRD (2^2) for separation efficiency oil-water

Table 2. Matrix of CCRD (2^2) with independent variables and response values for separation efficiency oil-water

Table 3. Variance analysis for validation of mathematical models (ANOVA)

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

FIGURE CAPTIONS

Figure 1: Experimental setup of the DAF prototype utilized for microbubble generation with aid of a centrifugal pump

Figure 2: Flowchart of components for recirculating of treated water and production of synthetic effluent

Figure 3: Experimental setup for microbubble production with aid of a centrifugal pump

Figure 4: Microbubble distribution in DAF chamber obtained through the simulation of computational fluid dynamics

Figure 5: Photograph showing distribution of microbubbles in flotation chamber of DAF prototype

Figure 6: Pareto chart of CCRD performed showing the significance of the experimental variables: X1, ratio oil/water outflow; X2, gauge pressure in pump entrance; L, linear effect; and Q, quadratic effect

Figure 7: Response surface of separation efficiency in function of air/water flow rate ratio and gauge pressure

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

SHORT TEXT FOR THE TABLE OF CONTENTS SECTION

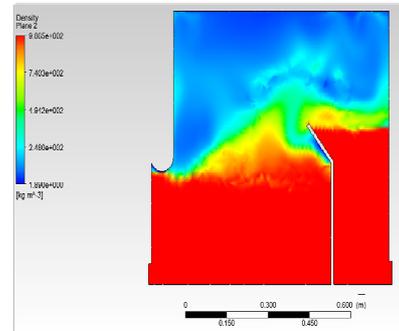
Research Article: This work describes the microbubble production technology using only a centrifugal pump, reducing cost of conventionally used equipment and reducing the physical space required.

Microbubbles generation with aid of a centrifugal pump

R. C. S. Henauth, R. S. Vasconcelos, A. E. Moura, V. A. Santos, L. A. Sarubbo*

Chem. Eng. Technol. **20XX**,
XX (X),

[XXXX...XXXX](#)



HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

May 28, 2015

Dear Editor,

We would like to submit for appreciation the paper “**Microbubbles Generation with Aid of a Centrifugal Pump**”.

We think our manuscript deserves to be published because we describe a simple strategy to reduce future risks in scale-up investments by using similarity correlations of the phenomena in a dissolved air flotation (DAF) chamber in a laboratory scale model.

The manuscript has around 2700 words, including references and no colored figures.

We inform that we have read and understood your policies concerning color charges and the Copyright Transfer Agreement.

We confirm that that the manuscript has been submitted solely to this journal and is not published, in press, or submitted elsewhere.

We have no conflict of interest.

Suggestions of possible reviewers are listed below.

I will hope that the present version of the manuscript is suitable for publication in **Chemical Engineering & Technology**.

Yours sincerely,

Prof. Dr. Leonie A. Sarubbo

My address:

Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Centro de Ciências e Tecnologia - NPCIAMB

Rua do Príncipe , n. 526, - Boa Vista.

CEP: 50050-900 - Recife/PE – Brazil

Phone: 55-81-2119 4084 - Fax: 55-81 2119 4004

E-mail: leonie@unicap.br

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Suggestions of possible reviewers:

Profa. Dra. Minerva Villanueva Rodríguez
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)
Nuevo León, Mexico
E-mail: minevardr@uanl.edu.mx

Prof. Dr. Peter H. Dimberg
Department of Earth Sciences
Uppsala University, Sweden
E-mail: peter.dimberg@geo.uu.se

Dr. Adalberto Pessoa Jr
Chemical Engineering Department
São Paulo University (USP)
São Paulo – Brazil
e-mail: pessoajr@pq.cnpq.br

Dr. Elias Basile Tambourgi – specialist in Chemical Engineering
Chemical Engineering Department
State University of Campinas (UNICAMP)
Campinas- Sao Paulo -Brazil
e-mail: eliastam@feq.unicamp.br

Dr. Ana Lúcia Figueiredo Porto
Animal Physiology Department
Federal Rural University of Pernambuco
Recife-Pernambuco- Brazil
e-mail: analuporto@yahoo.com.br

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Normas Para Submissão em Periódico Internacional

Chemical Engineering & Technology

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

This guideline consists of two parts. The first part covers all aspects regarding the manuscript preparation while the second refers to the submission process. To avoid any delay and time-consuming restructuring, we ask and encourage our authors to read the guidelines **before** writing the manuscript. Please note our checklist which will help you to avoid the most common mistakes.

PART I

1 GENERAL

Chemical Engineering & Technology is a peer-reviewed journal that covers all aspects of chemical engineering, process engineering, biotechnology, and design of apparatus. The ethical guidelines for publication issued by the [Committee on Publication Ethics](#) (COPE) are followed and applied by Chemical Engineering & Technology. Additionally, Chemical Engineering & Technology ensures compliance by using plagiarism detection software. Authors should declare any conflict of interest in their cover letter. **Manuscripts which do not follow the “Instructions for Authors” will not be further processed.**

We encourage our authors to visit our webpage [“Tips for Writing Better Science Papers”](#) published by Wiley-VCH. Furthermore, we refer to the recent January

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

issue of Chem. Eng. Technol.. This issue is accessible free of charge and should help authors to get an impression of the final layout.

2 TYPES OF CONTRIBUTIONS

Review Articles give a general overview of a particular field providing the reader with an appreciation of the importance of the work. Rather than an assemblage of information with a complete literature survey, a critically selection of the material is desired. Review Articles should not exceed 45 000 characters (incl. blanks). Up to 15 main figures – comprising a total of max. 23 subfigures – may be included.

Research Articles report details of studies that have not been published previously, except in the form of a preliminary note. Research Articles have to be limited to 28 000 characters (incl. blanks). Up to 10 figures – comprising a total of max. 15 subfigures – may be included.

Communications are short reports on experimental or theoretical studies in all areas covered by *Chemical Engineering & Technology*. The results must be of general interest or at least contribute to the development of an important area of research.

Communications should be limited to 18 000 characters (incl. blanks). Up to 6 figures – comprising a total of max. 9 subfigures – may be included.

3 LANGUAGE

Papers must be written in English. Use American spelling. Please use a simple, clear style, and avoid jargon. Manuscripts should be checked by a native English speaker prior to submission. Please inform us in the cover letter if your manuscript has been professionally edited before submission, such as by [Wiley English Language Editing Services](#).

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

4 ORGANIZATION OF MANUSCRIPT / FORMAT

The sequence of the parts of the main document should be:

Title of the article – Authors – Abstract – Keywords – Text of the contribution – Acknowledgment – Appendix – Symbols used – References – Tables with headings – Figure legends – Short text for the table of contents section

Manuscripts should be divided into sections and subsections by headings and subheadings. Footnotes to the text are to be avoided.

Please submit your paper as a MS Word file. Manuscripts written in a TEX-format, even if they are submitted as a PDF, have to be converted. **Please do not** use any word template or try to arrange your text, figures, tables according the final layout of a published article, e.g., two columns, scale-down of figures etc.

In case you are not willing to pay for color reproduction in the printed and online version of your article, please do not refer to any color in your figures within the text, figure legends etc.

4.1 Title

The title of the paper should be given with as many meaningful terms as possible, but limited to about twelve words or 100 characters. Avoid abbreviations and terms like “Contributions to the Development of...”, “Study of...”, “Novel”, “New” etc.

4.2 Authors

Give the names of all authors with at least one forename spelled out for every author. Please provide the full address of each author. The author, to whom the

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

correspondence shall be addressed, has to be indicated. If requested, *Chem. Eng. Technol.* marks authors who have contributed equally to the manuscript.

4.3 Abstract

Each article comprises an abstract (600–800 characters,). The abstract should be as informative as possible but the presentation of experimental details should be avoided. This is, however, **not** the section where detailed values should be provided. The abstract should contain several keywords to aid finding the paper online. The abstract should contain neither hints to graphical elements or tables in the paper nor to references, as the abstract will be found independently, e.g., in databases. Please do not copy sentences of the introductory part. The style guide mentioned in Sect. 4.5 has also to be followed in this section.

4.4 Keyword

Some meaningful keywords (max. 5) should be provided in alphabetical order. Avoid abbreviations. One keyword is limited to three words. Try to identify keywords a reader would be looking for.

4.5 Main Part

As mentioned earlier, *Chem. Eng. Technol.* uses American spelling, e.g., behavior, optimization, modeling, etc. Manuscripts should be divided into sections and subsections by headings and subheadings. Footnotes to the text are to be avoided. Furthermore, please avoid phrases like “we believe“, “we feel“, “we conduct“, “we can see“, as well as personal opinions. Authors are only allowed to use the first person when it helps to compare results, e.g., “Jones reported ..., but our results”.

Please create subordinated clauses whenever appropriate instead of an excessive use of parentheses and dashes. Parentheses are allowed within the

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

text when mentioning suppliers of chemicals and equipment and purity of chemicals, e.g., acetone (99+%, Sigma Aldrich).

Tables and figures are not shown in the main part. Please denote the position of the table/figure after the first occurrence in the main text by adding the note “((Figure x/Table y))” after the passage. In the text, sections, tables, figures and equations are to be referred as abbreviated Sect. x, Tab. x, Fig. x, and Eq. (x), respectively.

4.5.1 Symbols, Units, Abbreviations

Please use italic symbols for variables and constants (e.g., p , V , n , R , T , Re), bold latin symbols for vectors and matrices, and roman type for mathematical expressions (e.g., \log , \ln , \tan , \exp). Please do not use one variable for different definitions.

Symbols used to represent variables, constants, quantities, properties, etc. must be defined in the text at their first occurrence. Please use exponents and not slashes within units, e.g., $g\ L^{-1}h^{-1}$. Only SI quantities and units are to be used (SI = *Système International d'Unités*). If data with non-SI units have to be reported, they should be put in parentheses behind the corresponding data with SI units. In addition, a list of all symbols and abbreviations used must be compiled at the end of the text under the heading “Symbols used”, see Sect. 4.7.

Abbreviations are always written base type.

Sub- and superscripts to variables are edited as mentioned above. Symbols for physical quantities are written in italics while abbreviations are written in base type, e.g., V_α **but** V_{max} .

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

4.5.2 Structural Diagrams and Mathematical Equations

Structural diagrams of molecules as well as mathematical equations should be drawn or written in the manuscript at the places in which they belong. They should always stand alone, i.e., occupy extra line, and have to be numerated in ascending order with Arabic numerals in parentheses. Important: *Chem. Eng. Technol.* does not distinguish between mathematical equations and reaction schemes.

Use the equation editor (Microsoft Equation Editor 3.0 or Mathtype 6.0) for equations. **Do not** import special symbols and characters as graphics/formula in the running text. Please use either the Symbol font or the “insert special symbol” option provided in most word processing programs.

Do not import equations as images.

If applicable, please use the template for structure drawings in ChemDraw. The template can be downloaded [here](#). In case another software is used, please use reasonable fonts and bond lengths/widths.

Please ensure the correct use of symbols within chemical reactions, e.g., \rightarrow , \Leftrightarrow , \leftrightarrow , etc. In case reaction schemes are not written using the equations editors, e.g., $A + B \Leftrightarrow C + C$, the most common arrows can be found within the font Lucida Sans Unicode.

4.6 Acknowledgment

Acknowledgments of financial support, advice, or other kinds of assistance should be made at the end of the paper under the heading “Acknowledgment”. Please do not use any abbreviation!

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

4.7 Symbols used

All symbols and abbreviations used in the manuscript have to be listed. Please divide this list in “Symbols”, “Greek symbols”, “Sub- and Superscripts”, and “Abbreviations”.

Please compile symbol, unit in squared brackets and meaning, e.g.,

R_P [g L⁻¹h⁻¹] volumetric productivity

4.8 References

The responsibility for the accuracy of references rests with the authors. Please ensure that references are formatted correctly, also in view of italics, bold letters, blanks, commas, DOI, etc.

References have to be numbered sequentially in the order in which they are cited in the text. The numbers should be enclosed in square brackets, e.g., “...as was shown by Brown [1], Johnson [2, 3], and Smith [4–7]”.

The footnote and endnote options provided by many text programs should not be used or have to be deactivated before submission. Additionally, in case professional reference software like EndNote, Refworks, etc. is used, please delete all field-functions before submission.

All journal abbreviations have to follow the recommendations published by [CASSI](#).

We encourage our authors to check DOIs by using [CrossRef](#).

In citing the literature, the formats below should be followed:

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

• **Journal Article**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, E. F. Author3, *Abbrev. Journal Title* **Year**, *Volume (Issue)*, first page–last page. DOI:

[1] K. Liebeton, J. Eck, *Eng. Life Sci.* **2004**, 4 (6), 557–562. DOI: 10.1002/elsc.200402156

• **Book**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, *Title of Book*, Edition, Publisher, Location **Year**.

[2] R. McWeeny, *Coulson's Valence*, 3rd ed., Oxford University Press, Oxford **1979**.

For towns in the USA specify the state (except for very well known ones such as New York); use the two-letter postal abbreviation. If the town is not well known, add the country, e.g., Dordrecht, The Netherlands. Only one location should be given.

• **Book Published in a Series**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, *Title of Book*, Edition, Series Title, Vol. no. (in series), Publisher, Location **Year**.

[3] L. B. Schein, *Electrophotography and Development Physics*, 2nd ed., Springer Series in Electrophysics, Vol. 14, Springer, Berlin **1992**.

Note that the series editors are **not** listed.

• **Multi-authored (Edited) Book**

a) Whole (or one or more volumes)

[no.]<tab>*Title of Book*, Edition (Eds: E. F. Editor1, G. H. Editor2, I. J. Editor3), Publisher, Location **Year**.

[4] *Handbook of Heterogeneous Catalysis* (Eds: G. Ertl, H. Knözinger, J. Weitkamp), Wiley-VCH, Weinheim **1997**.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

b) Chapter

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, in *Title of Book*, Edition (Eds: E. F. Editor1, G. H. Editor2, I. J. Editor3), Publisher, Location **Year**, Ch. no.

[5] T. Kodas, in *The Chemistry of Metal CVD* (Eds: T. Kodas, M. Hampden-Smith), VCH, Weinheim **1994**.

The chapter number at the end (e.g., Ch. 5) is optional. A page number is sometimes given instead of a chapter number, e.g., 312. The first and last pages may also be given, e.g., 312–345.

• Proceedings Volume

a) Whole volume

[no.]<tab>*Abbrev. Proc. Title* (Eds: A. B. Editor1, C. D. Editor2), Publisher, Location **Year of publication**.

[6] *Proc. of the 4th Int. Conf. on Rheology* (Eds: E. H. Lee, A. L. Copley), Interscience, New York **1965**.

Note that in the proceedings title only words such as Conference (Conf.), International (Int.), or Symposium (Symp.) are abbreviated. The subject of the meeting itself is not abbreviated. The year is the year of publication, which is not necessarily the year the conference was held.

b) Paper

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, E. F. Author3, G. H. Author4, in *Abbrev. Proc. Title* (Eds: I. J. Editor1, K. L. Editor2), Publisher, Location **Year of publication**, p. no.

[7] A. Katschalsky, A. Oplatka, in *Proc. of the 4th Int. Conf. on Rheology* (Eds: E. H. Lee, A. L. Copley), Interscience, New York **1965**.

The page number is optional.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

• **Presentation at a Conference (Proceedings not Published)**

[no.]<tab>A. B. Author1, *Abbrev. Conf. Title*, Location of conference, Month and **Year of conference.**

[8] A. Katschalsky, *4th Int. Conf. on Rheology*, San Diego, CA, September **1964.**

• **Thesis**

[no.]<tab>A. B. Author, *Degree Thesis*, University((Location)) **Year.**

[9] T. Bieringer, *Ph.D. Thesis*, Universität Bayreuth **1996.**

Note that the degree (Diploma, M.Sc., Ph.D., etc.) should be specified. The location needs only to be given if it is not obvious from the name of the university.

• **Patent**

[no.]<tab>A. B. Author1, A. B. Author2 (Company), *Country Patent Number*, **Year.**

[10] R. Koksang, *US Patent 5 487 959*, **1996.**

If a patent is consigned to a company, the company name may be included in brackets after the names of the authors. Rather than a country, the patent may be a world patent or a European (EU) patent.

• **Work Accepted for Publication**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, E. F. Author3, *Abbrev. Journal Title*, in press. DOI:

[11] C. Wang, Y. Zhang, *Adv. Mater.*, in press. DOI: 10.1002/adma.200400418

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

4.9 Tables

Every table must be referred to in the text, e.g., “(see Tab. 3)”.

Tables have to be numbered with Arabic numerals in the sequence in which they occur. They are to be typed at the end of the manuscript. The table caption must explain in detail the contents of the table. As the table itself, it must be written so that it can be read and understood without reference to the text.

Every column and every line of a table must be labeled unambiguously and indicate units wherever data are reported.

Footnotes in tables are denoted a), b), c), etc.

Tables **must not** be submitted as images. Use the table function provided by MS Word instead.

4.10 Figure Legends

Figure legends have to be self-explanatory. In case of subfigures, annotations like (a), (b), (c), etc. have to be used instead of bottom, left, right etc. In case a complete setup is shown, the list of components has to be listed in the figure legend, not in the figure itself (see also Sect. 5).

Particular care should be taken to ensure that figures reporting data are unambiguously labeled with regards to units and, in their legends, provide adequate information about the condition under which the data were obtained.

4.11 Table of Contents: Graphical Abstracts

A short text for the Table of Contents (300–400 characters) must be included as the last page of the main document of every manuscript formulated to encourage readers to read the article. Repetition or a paraphrase of the title and presentation of experimental details should be avoided. In this section, colored

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

graphics are generally advantageous. Authors are invited to submit a colored figure free of charge for the ToC. This figure will be used for further advertising. Please do not refer to this figure within the article. A template can be downloaded [here](#).

5 FIGURES AND DIAGRAMS

As mentioned in Sect. 2, the number of figures is limited by the type of contribution. The number of subfigures is the total limit for the whole manuscript. **One main figure may consist of max. four subfigures.** Please note that one subfigure may draw on 1/8 of the final printed page. One main figure must not draw on more than 1/2 of the final printed page. Please use the Supporting Information (Sect. 6) to present figures and diagrams of long term experiments.

Figures should be sent as TIF, JPG, or EPS files with highest resolution possible (at least 300 dpi). Please do not implement the figures in MS Word or Powerpoint files (except figures for Supporting Information)

Analytical spectra (NMR, IR, GC, GC-MS, UV-VIS, Fluorescence, ESR, etc.) have to be submitted as Supporting Information (Sect. 6) and only the relevant areas of the spectra should be inserted in the main text.

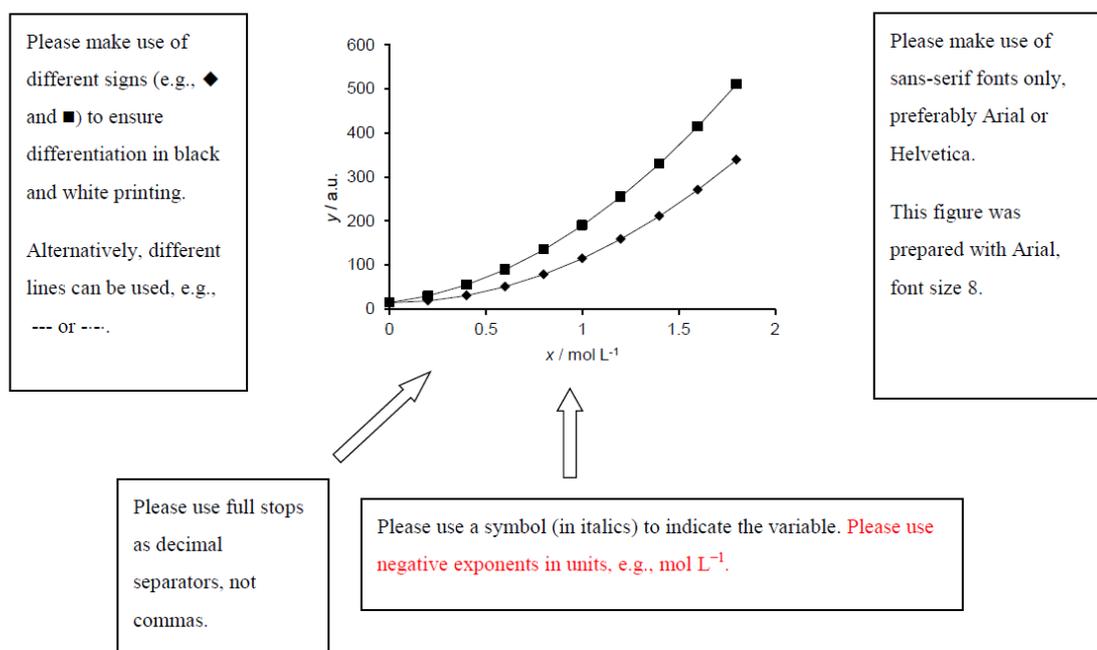
Figures will be printed in grayscale. Color artwork can be reproduced. The extra costs associated with this are expected to be met, in part, by the author. The current price list can be downloaded from our homepage. The manuscript will neither be edited nor published without [cost confirmation](#) for color figures.

Colored figures which are to be printed in grayscale have to be converted by the author before manuscript submission and peer review. Please ensure the visibility and differentiation of details. Please notice that the online article is

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

generated from the printed version, therefore only those figures that appear in color in print will be reproduced in color online.

The quality of the figures must be such that they can be reproduced directly after reduction. Numbers, letters, and symbols inscribed must be large enough to be still 2 mm high after the figure has been reduced to the printing format. Thus make sure that the size of the writing is big enough. Ideally, please use font size 8 for an image with 85 mm width.



Every figure must be referred to in the text. All figures are to be numbered with Arabic numerals in the sequence in which they appear.

Subfigures have to be numbered with “a)”, “b)” etc. Subfigures **must not** be referred as, e.g., “Fig. 2, bottom right”.

In case you are not willing to pay for color reproduction in the printed and online version of your article, please do not refer to any color in your figures within the text, figure legends etc.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

The figure legend (beginning with, e.g., “Figure 5...”) must explain in detail the contents of the figure and – as the figure itself – must be comprehensible without reference to the text.

Legends are not to be typed under the figures, but should be collected at the end of the article.

The responsibility for providing permissions to reprint Figures and Tables and any associated costs rests entirely with the autho.

6 SUPPORTING INFORMATION

Experimental procedures, spectroscopic data, graphics, etc. that are essential for understanding the main points of the publication but could be considered supplementary or cannot be included in the actual publication for space reasons or because of technical limitations, e.g., animated multimedia applications and movies, should be provided online as Supporting Information. This material is available free of charge to authors and readers, and appears simultaneously with

the publication of the article. In the relevant sections of the article, reference should be made to the Supporting Information. The scientific quality of the Supporting Information and the preparation of the text and graphics should be of the same standard as that in the actual publication. The Supporting Information should start with a Table of Contents, and the relationships between the sections of the main article and the Supporting Information should be apparent. To submit multimedia files, please contact the editorial office. The Supporting Information has to be submitted as a MS Word file including all figures.

7 GALLEY PROOFS

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Galley proofs and a reprint order will be sent electronically to the correspondence author mentioned in the article. Please correct your proof using the electronic annotation tools as instructed in the "Using E-annotation Tools" guidelines that can be found attached to the email which delivers the proofs. The corrections have to be submitted within five days after receiving the galley proof. Please also inform the editorial office if no corrections are needed.

8 AUTHOR COPIES

Copies of the printed issue can be ordered with a discount. Reprints and PDF-files are only available upon order. Conditions can be seen from the order form which is sent together with the galley proofs.

9 OPEN ACCESS/ONLINE OPEN

If authors have to or want to make their publications freely available at the moment they are published (open access), *Chemical Engineering & Technology* offers such a service. Under the keyword [Online Open](#) you can find all the information about this subject on our homepage. An open access form is attached to the letter of acceptance.

10 COPYRIGHT TRANSFER AGREEMENT

Please download and confirm the Copyright Transfer Agreement (CTA). Please send us the CTA as soon as you receive the letter of acceptance. Manuscripts will neither be edited nor typeset without a valid CTA.

Part II

11 Submission of Manuscripts

Go to <http://mc.manuscriptcentral.com/cet> or access via our home page <http://www.cet-journal.com> (Left hand side: For Contributors ⇒ Submit an Article). This homepage must also be used to upload the revised and final versions of all manuscripts submitted to *Chemical Engineering & Technology*.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Please read our Checklist before starting the submission process to avoid any unnecessary delays.

If you use the system for the first time, you need to click on the “Register here” link. If you have been an author or referee for *Chemical Engineering & Technology* recently, you do have an account and your e-mail address will already be in the database. In case you forgot your password, enter your e-mail address under “Password Help” on the Log In screen. You will receive an automatically generated e-mail, providing you with the details to access your personal homepage (login and password).

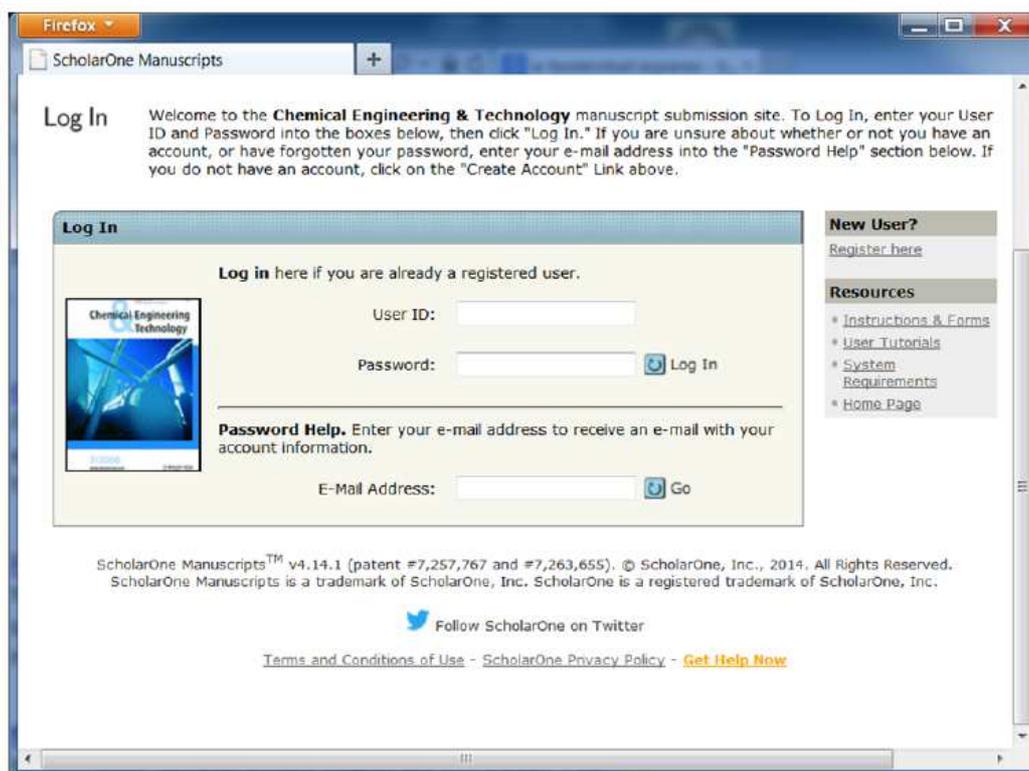


Figure 1. Starting page for the submission

Once logged in, please click on “Author Center” and let the system guide you through the submission process. **Please follow the instructions given on top of the pages during the submission process.** Online help is available at all times. It will be possible to exit and reenter the system without losing any

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

information at any stage of the submission process. All submissions are kept strictly confidential.

Step 1

Please choose the type of contribution you want to submit, see Part I/Sect. 2.

Please enter the title in base type – never capital letters exclusively – (see Part I/Sect. 4.1) and add the original abstract of your manuscript (see. Part I/Sect. 4.3).

Please choose whether you are an author or a submitting agent. Submitting agents are not mentioned in the list of authors at all.

If applicable, click yes if asked whether you submit to a topical issue. The title of the topical issue is specified during step 5 of the submitting process.

Step 2

Please enter at least three meaningful keywords, max five (see Part I/Sect. 4.4). You can either select keywords from the list provided (preferred) or choose some of your own. Submit keywords a reader would be looking for.

Step 3

Please enter all authors who contributed to this manuscript. Please ensure the correct spelling/assignment of the first and family names and avoid capital letters to denote the family names. As requested, please denote the formal corresponding author as mentioned in the manuscript. Please mention the main research affiliation and not affiliations/e-mail addresses of short-term assignments. However, short-term assignments may be mentioned in the manuscript.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Step 4

Nominate at least three reasonable potential reviewers from three different nations and different institutions - and none of them should be from your own institution, university or country. Give complete name, e-mail address and institution plus country. Please ensure that the e-mail-address is still valid. Authors are not allowed to contact potential reviewers and to ask for their approval.

Step 5

Cover Letter: Please explain the topic of your contribution, why it is important, what is new about it, and why you think it deserves publication. Highlight the breakthrough you report in your article and give the take-home message of your contribution in the cover letter. Explain the significance in a way that is accessible to non-specialists. **Please, do not repeat the abstract!**

Manuscript Details: Please give us a short overview of the size of your manuscript. The total number of figures includes also the colored figures. Please note that we ask our authors to contribute towards the extra cost incurred for the reproduction of color. Therefore, only mention the sum of figures for which you are willing to pay for. As mentioned in Part I/Sect. 5, all figures which are to be printed in grayscale have to be converted to grayscale before the submission – even for the review process. Colored figures which are to be printed exclusively in the graphical abstract are free of charge.

Policy Responses: Please confirm that you have read and understood our policies concerning color charges and the Copyright Transfer Agreement, which has to be signed and submitted as soon as your manuscript has been accepted. All forms can be downloaded [here](#).

Submission Information: Please confirm that the manuscript has been submitted solely to this journal and is not published, in press, or submitted elsewhere.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

Chem Eng. Technol. follows the ethical guidelines for publication issued by the Committee on Publication Ethics and any violation of this confirmation will be punished.

Conflict of Interest: Any conflict of interest has to be announced. A note whether or not a conflict has been declared will be published in the article.

Color Charges: Please confirm whether or not you are willing to pay for colored figures. As soon as the manuscript has been accepted, the color confirmation has to be signed and sent to the editorial office.

Special Issue Information: In case you have stated (step 1) that this article is to be published within a special issue, please choose the topical issue by copy-paste the corresponding topic from the list mentioned on the top of the page.

Step 6

Please remove the figures from the text and upload your manuscript and your figures separately (Part I/Sect. 5).

We need separate files for the text only and each figure.

Please submit the Supporting Information as MS Word file (Part I/Sect. 6).

Due to the file size, the upload may take some time. Please do not close the window while the upload is running.

Step 7

Please review your submission and confirm the submission. You will receive a confirmation letter after successful submission informing you about your manuscript number.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de Microbolhas Utilizando a Indução de Ar Atmosférico para Melhorias no Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD).**

End of submission!

In case of any questions which cannot be answered by these guidelines, please contact the editorial office:

Chemical Engineering & Technology

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Boschstraße 12

69469 Weinheim

Germany

Tel. +(49) 6201 606-520

Fax +(49) 6201 606-203

Email: cet@wiley.com

