



PROGRAMA EQ-ANP

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria
do Petróleo e Gás Natural**



**Estudo e simulação numérica de
precipitadora eletrostática**

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Setembro de 2012

ESTUDO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PRECIPITADORA ELETROSTÁTICA

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Refino e Processamento.

Aprovado por:

Amaro Gomes Barreto Jr., D.Sc.

Paulo Laranjeira da Cunha Lage, D.Sc.

Maurício de Alencar, Eng

Orientado por:

Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Luiz Fernando L. R. Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2012

Smiderle, A.L.R.S.M.

Estudo e simulação numérica de precipitadora eletrostática. / Álvaro Luiz Ribeiro

Sarmet Moreira Smiderle. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012.

vii, 52 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2012.

Orientadores: Márcio Nele de Souza e Luiz Fernando Lopes R. Silva.

1. CFD. 2. Eletrocoalescência. 3. Lagrangeano. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Márcio Nele de Souza e Luiz Fernando Lopes R. Silva I. Título.

Dedicatória

Dedico esta monografia a minha família por toda confiança e esperança a mim
confiadas.

Citação

“Deus ao mar o perigo e o abismo deu,
Mas nele é que espelhou o céu”.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo de bom que já fez e continua fazendo em minha vida. Agradeço também, por sua atenção e preocupação, a todos os colegas do LTFD que me ajudaram com incentivo e conselhos. Não deixo de agradecer a meus orientadores por sua ajuda nesta longa e difícil caminhada: Márcio, meu “chefe desde muito tempo” e Luiz sempre muito disposto a me ajudar.

A meus pais, certamente sem o apoio deles, mesmo de outra cidade, não teria chegado até aqui.

À minha namorada, Jéssica, que soube ser paciente e compreensiva pela minha ausência nos momentos de dificuldade na faculdade e principalmente na elaboração da minha monografia.

Agradeço à minha família pelo apoio, compreensão e incentivo. Em especial o pessoal de Niterói que acompanharam mais de perto a minha jornada na graduação: Carmen, Maria Angela, Joice, Giuliane e Portilho.

Ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo – ANP** – e da **Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP** – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao **PRH 13**, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Refino e Processamento.

ESTUDO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PRECIPITADORA ELETROSTÁTICA

Álvaro Luiz Ribeiro Sarmet Moreira Smiderle
Agosto, 2012

Orientadores: Prof. Márcio Nele de Souza, D.Sc.
Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

As plantas de processamento primário de petróleo *offshore* são projetadas para tratar o petróleo proveniente dos poços, separando com segurança o óleo do gás e da água. Nas plataformas, os principais equipamentos para promover a separação são os separadores gravitacionais, nos quais, a diferença de densidade entre o óleo e a água é a força motriz para a separação das fases. Tendo em vista a necessidade em reduzir o tamanho dos equipamentos, a emulsão é submetida a um tratamento eletrostático de modo a aumentar o diâmetro médio das gotas de água na emulsão de petróleo diminuindo o tempo de residência da emulsão nos tanques de sedimentação, mantendo uma boa eficiência de separação.

A simulação eletrostática acoplada à fluidodinâmica é indispensável para a otimização da operação dos precipitadores eletrostáticos, e tendo em vista a necessidade constante de redução do tamanho dos separadores *offshore*, onde o espaço é muito caro, simulações CFD surgem como uma ferramenta muito útil para o projeto destas unidades.

Este trabalho mostrou que é possível acoplar a solução eletrostática com a fluidodinâmica em simulações CFD. Utilizando uma abordagem Lagrangeana simplificada, os resultados numéricos concordaram qualitativamente com os dados experimentais. A eficiência de separação em um precipitador eletrostático é diretamente proporcional à intensidade do campo elétrico aplicado, porém durante a operação do equipamento devem-se evitar curtos-circuitos que diminuem drasticamente a eficiência de separação. Neste trabalho não se adotou um critério para a formação de curtos-circuitos.

ÍNDICE

1.	Introdução.....	7
2.	Fundamentos do escoamento multifásico.....	9
2.1.	Sistemas coloidais.....	9
2.2.	Modelagem matemática de escoamentos multifásicos.....	13
2.2.1.	Abordagem Euleriana-Euleriana.....	13
2.2.2.	Abordagem Euleriana-Lagrangeana.....	16
2.2.3.	Modelos de colisão interparticular.....	18
2.3.	Eletromecânica de partículas.....	23
3.	Eletrocoalescência e dessalgação.....	28
3.1.	Fenomenologia.....	28
3.2.	Tecnologias de tratamento eletrostático de petróleos.....	31
4.	Simulações numéricas.....	35
4.1.	Descrição do caso base.....	35
4.2.	Modelos e condições de contorno.....	36
4.3.	Estratégias de solução.....	39
5.	Resultados.....	40
5.1.	Verificação da solução do campo elétrico.....	40
5.2.	Teste de convergência de malha.....	42
5.3.	Simulação da curva de eficiência de separação.....	45
6.	Conclusões.....	52
7.	Bibliografia.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema ilustrativo de forças atuando sobre uma partícula na interface água-ar (MASLIYAH e BHATTACHARJEE, 2006).....	10
Figura 2.2- Representação esquemática dos mecanismos de degradação de emulsões. 11	
Figura 2.3 - Desenho esquemático dos regimes de escoamento multifásico. Retirado de (BRENEN, 2005).	13
Figura 2.4 - Diagrama de efeitos de colisão: (a) reflexão, (b) coalescência, (c) quebra, (d) separação elástica.....	19
Figura 2.5 - Descrição dos parâmetros envolvidos na colisão de duas partículas.....	20
Figura 2.6 - Representação de um dipolo finito (JONES, 1995).....	23
Figura 2.7 - Representação esquemática da força de atração entre duas esferas condutoras (CHIESA, MELHEIN, <i>et al.</i> , 2005).....	26
Figura 3.1 – Polarização de esferas dielétricas.....	28
Figura 3.2 - Parâmetros críticos estudados por Atten, Lundgaard e Berg (2006).	31
Figura 3.3- Efeito da temperatura na viscosidade do petróleo e nas densidades da salmoura e do petróleo.....	32
Figura 4.1- Geometria (a) real e (b) modelada do eletrocoalecedor de Eow e Ghadiri (2002).	36
Figura 4.2- Condições de contorno usadas nas simulações.....	37
Figura 5.1- Geometria e malha para verificação da solução do campo elétrico.....	40
Figura 5.2 - Perfil de potencial elétrico entre duas placas planas infinitas.	41
Figura 5.3- Linhas utilizadas na avaliação da convergência de malha.....	42
Figura 5.4- Perfil de pressão estática ao longo das linhas (a) horizontal e (b) vertical. .	43
Figura 5.5– Perfil de campo elétrico ao longo das linhas (a) horizontal e (b) vertical...	44
Figura 5.6– Malha utilizada nas simulações.....	45
Figura 5.7 - Contornos de velocidade no plano central do domínio.	45
Figura 5.8 - Contornos de potencial elétrico com eletrodos a (a) 0,5kV, (b) 1,0kV, (c) 1,5kV e (d) 2,0kV.	46
Figura 5.9 - Curvas de eficiência de separação.	47
Figura 5.10– Distribuição de tamanho de gota no (a) <i>underflow</i> e (b) <i>overflow</i>	49
Figura 5.11 - Distribuição do tempo de residência no (a) <i>underflow</i> e (b) <i>overflow</i>	50
Figura 5.12 - Integral do número de colisões ao longo do tempo.	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Propriedades dos fluidos.	35
Tabela 4.2 - Condições de contorno.	37
Tabela 5.1- Parâmetros da distribuição de tamanho de gota e de tempo de residência... ..	48

NOMENCLATURA

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
\vec{u}	Velocidade de fluido
\vec{T}	Tensor de cisalhamento
\vec{J}	Fluxo difusivo
\vec{F}	Vetor de Forças de campo
\vec{E}	Campo elétrico
\vec{p}	Momento de dipolo
\vec{g}	Aceleração da gravidade
\vec{f}	Aceleração devido a forças externas
$\overrightarrow{F_{MV}}$	Massa virtual
\vec{S}_{mom}	Fonte de momento linear devido a partículas
$\overrightarrow{a_{el}}$	Aceleração devido às forças elétricas
C_D	Coefficiente de arraste
F_D	Força de arraste
d_p	Diâmetro da partícula
r_p	Raio da partícula
V_{col}	Volume de colisão
t	Tempo
V_{cel}	Volume da célula computacional
n	Número de gotículas em uma parcela
P	Probabilidade de colisão
B	Parâmetro de impacto dimensional
D	Diâmetro
b	Parâmetro de impacto adimensional
b_{crit}	Parâmetro de impacto crítico
v	Módulo da velocidade da partícula
m	Massa
q	Carga elétrica
U	Potencial elétrico
f	Frequência de oscilação do campo elétrico

LETRAS GREGAS

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
ψ	Propriedade genérica
$\dot{\phi}$	Termo fonte volumétrico
ρ	Densidade volumétrica
$d\Omega$	Volume de controle
S	Superfície de controle
$\langle\psi\rangle$	Propriedade média volumétrica global
$\langle\psi\rangle_k$	Propriedade média intrínseca de fase da k-ésima fase
α_k	Fração volumétrica da fase k
$\mathcal{M}_{i,k}$	Termo de transferência de massa entre fases i e k
$\mathcal{F}_{i,k}$	Termo de transferência de <i>momentum</i> entre fases i e k
ε	Permissividade do meio
μ	Viscosidade cinemática
β	Função de Clausius-Mossotti
Γ	Coefficiente de difusividade genérica
ξ	Função auxiliar de colisão
σ	Tensão interfacial

SOBRESCRITOS

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
'	Propriedade após a colisão

SUBSCRITOS

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
k	k-ésima fase
p	Propriedade da partícula
f	Propriedade do fluido contínuo
1	Referente à parcela da menor partícula
2	Referente à parcela da partícula coletora
rel	Relativo à diferença entre fase contínua e dispersa

GRUPOS ADIMENSIONAIS

<i>Símbolo</i>	<i>Nome</i>
$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$	Número de Reynolds
$We = \frac{\rho D_1 \vec{u}_{rel} ^2}{\sigma}$	Número de Webber
$\Delta = \frac{D_1}{D_2}$	Razão de diâmetros das partículas
$b = \frac{2B}{D_1 + D_2}$	Parâmetro de impacto adimensional

1. Introdução

Poços *offshore* produzem petróleo com certo teor de água, sendo que esta quantidade tende a aumentar com o tempo, principalmente quando se estimula a produção injetando água no poço (EOR – *Enhanced Oil Recovery*). Quando a mistura óleo-água passa pela válvula de alívio de pressão é formada uma emulsão com alto percentual de gotas microscópicas. Já nas refinarias a primeira unidade de processo é chamada dessalgação, na qual água é injetada para dissolver sais presentes em quantidade considerável no petróleo. Sendo assim, para promover uma boa transferência de sal da fase oleosa para a aquosa é necessária uma agitação eficiente, uma vez que ao misturar água ao óleo salgado, os sais migram para a fase aquosa deixando o petróleo quase isento de sal. Com isso, essa agitação é responsável por formar emulsões que devem ser separadas eficientemente, e por isso, a remoção de sais é necessária para evitar incrustações e corrosão. Dessa forma, antes de bombear o petróleo para terra é desejável que se retire a maior parte da água presente na emulsão, já que dessalgar o petróleo cru é necessário devido à relação entre o preço do óleo cru exportado e sua qualidade. Então, um incremento de uma parte por milhão (ppm) de água e salmoura reduz o preço do óleo cru em aproximadamente 0,85-1,3US\$ por barril (VAFAJOO, GANJIAN e FATTAHI, 2012).

As plantas de processamento primário de petróleo *offshore* são projetadas para tratar o petróleo proveniente dos poços, separando com segurança o óleo do gás e da água. Nas plataformas, os principais equipamentos para promover a separação são os tanques de separação, que operam como separadores gravitacionais, nos quais, a diferença de densidade entre o óleo e a água é a força motriz para a separação das fases. Tendo em vista que a velocidade de sedimentação aumenta proporcionalmente ao quadrado do diâmetro das gotículas, uma forma de diminuir o tempo de residência da emulsão nos tanques de sedimentação, mantendo uma boa eficiência de separação, é aumentar o diâmetro médio das gotas de água na emulsão de petróleo. Para esta finalidade a emulsão é submetida a um tratamento eletrostático, que é eficiente na desidratação do óleo cru removendo sedimentos e sais indutores de corrosão, reduzindo assim a corrosão e deposição nos equipamentos de processo *downstream*.

O tratador eletrostático ou dessalgadora é um equipamento no qual se utiliza um campo elétrico para promover a coalescência das gotículas em gotas maiores. Os tratadores

eletrostáticos são vasos geralmente horizontais com altos tempos de residência. Porém, precipitadores eletrostáticos compactos estão sendo fabricados, mas a falta de uma melhor descrição/entendimento do fenômeno da eletrocoalescência impede a otimização da montagem e operação destes equipamentos (ATTEN, LUNDGAARD e BERG, 2006).

Muitos trabalhos experimentais têm sido realizados sobre eletrocoalescência, porém a simulação numérica é uma alternativa para o estudo do processo de tratamento eletrostático de emulsões. Com simulações numéricas é possível aperfeiçoar a operação do equipamento, sugerir pequenas mudanças geométricas ou até mesmo avaliar individualmente cada uma das forças presentes no fenômeno da eletrocoalescência.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo esclarecer alguns aspectos da eletrocoalescência usando corrente alternada e propor uma metodologia de simulação numérica acoplando CFD e eletrostática. O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão sobre sistemas coloidais e emulsões e mostra alguns fundamentos para modelagem de escoamentos multifásicos. Em seguida, no Capítulo 3, serão abordados alguns detalhes acerca do fenômeno da eletrocoalescência. No Capítulo 4, estão descritos as simulações realizadas bem como os modelos utilizados e as estratégias de solução. No Capítulo 5 serão apresentados os resultados das simulações descritas no capítulo anterior e finalmente no Capítulo 6 são concluídas as ideias e feitas algumas considerações finais.

2. Fundamentos do escoamento multifásico

Escoamentos multifásicos são os escoamentos onde mais de um estado de agregação estão presentes (POPOFF e BRAUN, 2007). Os sistemas multifásicos estão presentes em inúmeros processos industriais, em especial na indústria de petróleo e petroquímica onde emulsões estão presentes em muitas etapas do processamento.

2.1. Sistemas coloidais

Uma dispersão coloidal é definida como um sistema multifásico no qual uma fase discreta, a fase dispersa, está suspensa num meio contínuo chamado dispersante ou fase contínua (MASLIYAH e BHATTACHARJEE, 2006). Para obter-se uma dispersão coloidal o tamanho da fase dispersa deve ter uma ordem de grandeza maior que as moléculas da fase contínua, ou seja, na faixa de 1nm – 10000nm. Uma emulsão é um sistema coloidal cujas fases dispersa e contínua são líquidos.

Numa emulsão, na qual o tamanho das gotículas é muito pequeno, a relação área superficial - volume é muito elevada. Isto faz que com que à medida que se diminui o tamanho das gotículas, as forças de superfície se tornem importantes comparadas às tradicionais forças de campo. Estas forças de superfície geralmente são dominantes em sistemas coloidais e são responsáveis por determinar o comportamento das emulsões (MASLIYAH e BHATTACHARJEE, 2006).

Muitos fatores influenciam nas propriedades de um sistema coloidal. Destacam-se:

- Tamanho e forma das partículas;
- Propriedades de superfície tanto físicas quanto químicas;
- Propriedades físicas e químicas da fase contínua;
- Interações entre partículas;
- Interações entre fases.

Diversas forças são importantes na descrição da interação entre fases contínua e dispersa. Dentre elas cita-se:

- Forças de atração e repulsão elétricas;
- Forças atrativas ou repulsivas de London-van der Waals;
- Força Browniana;

- Força viscosa;
- Força inercial;
- Força gravitacional;
- Forças estéricas (*size-exclusion*);
- Tensão superficial.

A estabilidade dos sistemas coloidais é resultante do equilíbrio de forças de atração e repulsão entre as partículas da fase dispersa. Na Figura 2.1 vemos o balanço de forças atuando sobre uma partícula na interface água-óleo.

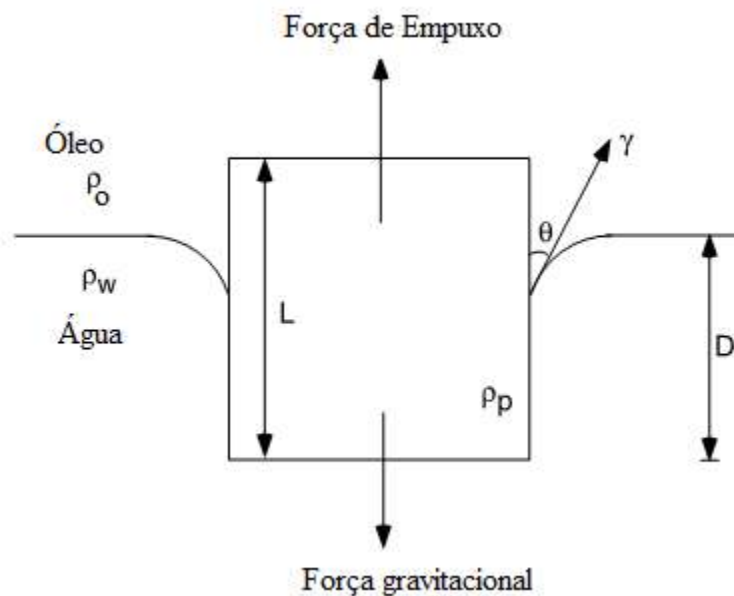


Figura 2.1- Esquema ilustrativo de forças atuando sobre uma partícula na interface água-ar (MASLIYAH e BHATTACHARJEE, 2006).

Se dois componentes são completamente “compatíveis”, ou seja, tem grande afinidade, estes não formam uma interface quando misturados. Neste caso, a energia livre de mistura é negativa. Por outro lado, quando dois componentes que não tem muita afinidade química são misturados, uma interface é formada dando origem a um sistema multifásico. Neste caso, a energia livre de mistura deve ser positiva. Apesar de as emulsões serem termodinamicamente instáveis, seu o critério de “estabilidade” é o tempo requerido para a completa separação das fases. Diz-se que uma emulsão é estável quando o tempo de quebra da emulsão é suficientemente grande para a aplicação à qual esta se destina.

Os processos de degradação de emulsões, isto é, que separam a emulsão em duas fases contínuas segregadas, são governados por quatro diferentes mecanismos: floculação Browniana, *creaming*, sedimentação e desproporção ou *Ostwald ripening*. Estes quatro mecanismos, esquematizados na Figura 2.2, podem ocorrer simultaneamente ou em qualquer ordem.

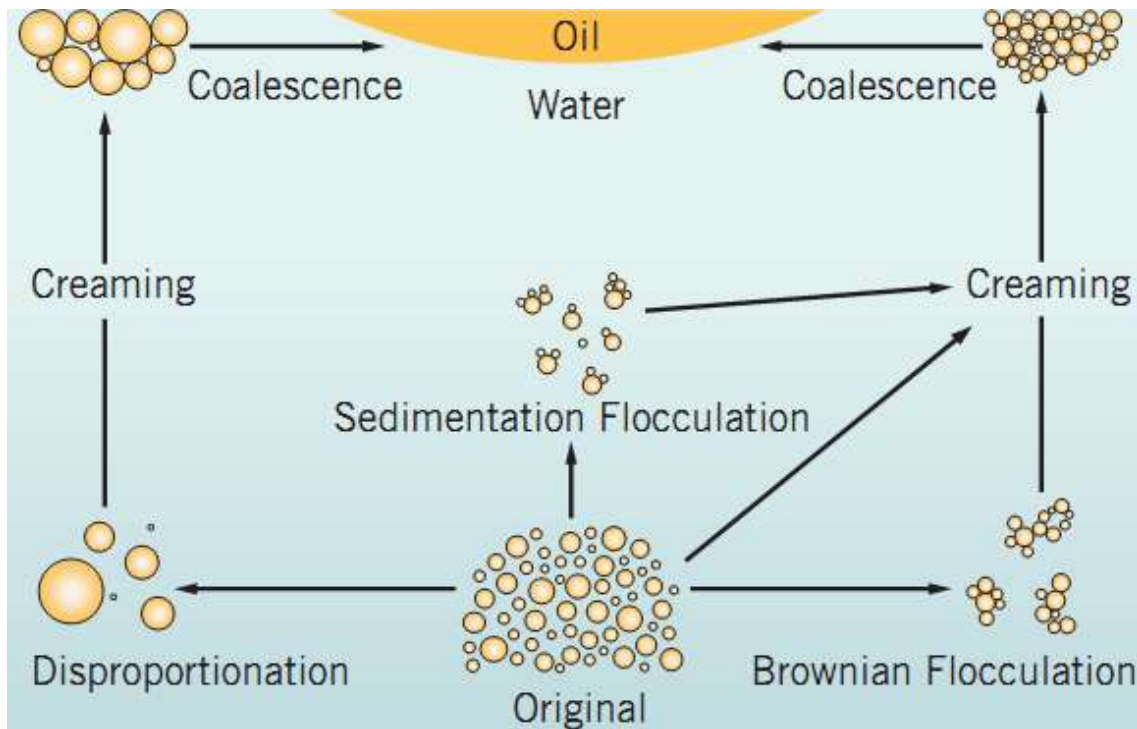


Figura 2.2- Representação esquemática dos mecanismos de degradação de emulsões.

Os mecanismos de *creaming* e sedimentação não envolvem quebra da emulsão, apenas uma separação em duas emulsões: uma mais concentrada em fase dispersa (um creme) e outra menos. A floculação ocorre quando há formação de aglomerados de gotículas sem haver coalescência das mesmas. Já o mecanismo de *Ostwald ripening* envolve a difusão de moléculas da fase dispersa de gotículas menores para as maiores. Isto ocorre devido a pressão interna em gotículas menores ser maior que em gotas com maior diâmetro. Este diferencial de pressão constitui a força motriz para a difusão, porém esta é limitada pela solubilidade da fase dispersa no meio contínuo.

Como dito anteriormente, as emulsões tem energia livre de mistura positiva, isto quer dizer que é necessário fornecer energia para formar uma emulsão. Existe uma relação entre a energia adicionada ao sistema e o diâmetro médio de gotas formado na emulsão.

O processo de emulsificação consiste em quebrar gotas grandes em menores devido ao cisalhamento imposto ao sistema. O fenômeno de quebra das gotas é governado por duas forças: a pressão de Laplace, que preserva a forma da gota, e a tensão devido ao gradiente de velocidade que causa a deformação das gotículas (OTHMER e KIRK, 1998).

No caso particular de emulsões da indústria de petróleo esta relação é importante, pois determina a influência da produção e processamento na formação de emulsões. As técnicas de produção resultam em emulsões estáveis de óleo cru e água, que requerem métodos de tratamento agressivos. A produção força a mistura de petróleo e água através de tubos verticais desde o poço até a superfície. Nesta elevação, a queda de pressão e altas taxas de cisalhamento produzem gotículas muito pequenas, e conseqüentemente, uma emulsão muito estável. Cada tipo de técnica de elevação/produção produz emulsões com características diferentes, por exemplo, *gas-lift* pode desidratar o petróleo deixando sais cristalinos suspensos no óleo. Ao contrário, *Steam flooding*, usado com óleos pesados e viscosos, produz um petróleo com grandes quantidades de água fresca (SAMS e ZAOUK, 2000).

Talvez a variável que mais influencia a estabilidade das emulsões formadas seja o cisalhamento gerado ao transportar o petróleo através de *pipelines*, com elevações ou não, de um equipamento para o outro. Uma fração de energia fornecida para o transporte é convertida em cisalhamento entre as fases aquosa e oleosa. Tal cisalhamento promove o aumento da área interfacial entre as fases, ou seja, ocorre a diminuição do tamanho das gotas da emulsão. Com isto, a separação das emulsões torna-se mais difícil (SAMS e ZAOUK, 1999).

Os processamentos térmicos podem ocasionar a precipitação de sais ao evaporar a água do petróleo causando sérios problemas. Também como consequência dos tratamentos térmicos dados ao petróleo é possível que haja precipitação de asfaltenos e parafinas que estabilizam a emulsão.

Já na cabeça do poço é dosada uma quantidade de agentes tensoativos com a finalidade de facilitar a separação das emulsões nas etapas posteriores de tratamento, sendo que a escolha destes agentes normalmente envolve experimentos laboratoriais.

2.2. Modelagem matemática de escoamentos multifásicos

Diversos padrões de escoamentos multifásicos são observados experimentalmente, conforme mostra a Figura 2.3, porém é muito difícil encontrar um modelo matemático suficientemente abrangente para descrever na totalidade todos os diferentes regimes de escoamento multifásico. Cada um destes regimes possuem características próprias e, portanto, devem ser modelados diferentemente. Neste trabalho o sistema encontra-se na região do escoamento disperso. Existem duas abordagens bem distintas para simular o escoamento multifásico disperso: a abordagem Euleriana-Euleriana e a Euleriana-Lagrangeana.

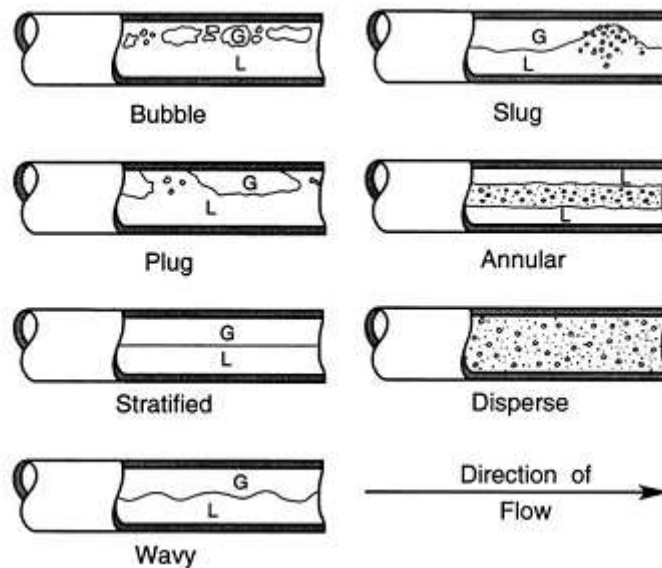


Figura 2.3 - Desenho esquemático dos regimes de escoamento multifásico. Retirado de (BRENEN, 2005).

2.2.1. Abordagem Euleriana-Euleriana

Nesta formulação, cada fase possui seu conjunto de equações de transporte (massa, *momentum* e energia) sendo necessário um processo de média que dá origem à fração volumétrica de cada fase e termos de interação entre as fases os quais necessitam de modelos de fechamento.

A aplicação do teorema de transporte de Reynolds para uma propriedade intensiva, por unidade de volume, genérica ψ_k dá origem ao balanço diferencial de propriedade em questão conforme a Equação (2.1).

$$\frac{\partial \psi_k}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u}_k \psi_k + \nabla \cdot \vec{J}_k = \dot{\phi}_k \quad (2.1)$$

Onde \vec{u}_k é a velocidade de uma partícula de fluido da k-ésima fase, \vec{J}_k é o fluxo difusivo e $\dot{\phi}_k$ é uma fonte volumétrica para a quantidade ψ_k . A equação da continuidade é obtida fazendo-se $\psi_k = \rho_k$, $\vec{J}_k = \vec{0}$ e $\dot{\phi}_k = 0$. Portanto a equação da continuidade pode ser escrita como a Equação (2.2).

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u}_k \rho_k = 0 \quad (2.2)$$

Para obtermos a equação de conservação de momento linear, a equação de Navier-Stokes, fazemos $\psi_k = \rho_k \vec{u}_k$, $\vec{J}_k = \vec{T}_k$ e $\dot{\phi}_k = \rho_k \vec{F}_k$ resultando na Equação (2.3).

$$\frac{\partial(\rho_k \vec{u}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \vec{u}_k \cdot \vec{u}_k) + \nabla \cdot \vec{T}_k = \rho_k \vec{F}_k \quad (2.3)$$

Onde \vec{T} é o tensor tensão e \vec{F}_k é o vetor de forças atuando sobre a k-ésima fase.

Para derivar as equações de um sistema multifásico considera-se um volume de controle $d\Omega$ cuja escala de comprimento é muito maior que o tamanho de uma partícula de fase dispersa, ou seja, neste domínio de promediação existe um número significativo de partículas da fase dispersa (POPOFF e BRAUN, 2007). Considerando o volume de controle definido pela superfície dS , podemos definir as seguintes quantidades:

- Média volumétrica:

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{d\Omega} \int_{d\Omega} \psi(\vec{x}, t) d\Omega \quad (2.4)$$

- Média intrínseca de fase:

$$\langle \psi \rangle_k = \frac{1}{d\Omega_k} \int_{d\Omega_k} \psi(\vec{x}, t) d\Omega \quad (2.5)$$

Assim, define-se a fração volumétrica da k-ésima fase como a fração definida pela Equação (2.6).

$$\alpha_k = \frac{d\Omega_k(\bar{x}_p, t)}{d\Omega} \quad (2.6)$$

Uma vez que $d\Omega = \sum d\Omega_k$ é fácil observar que o somatório de todas as frações volumétricas é igual à unidade.

$$\sum_{k=1}^{NF} \alpha_k = 1 \quad (2.7)$$

Conseqüentemente, uma propriedade média de fase é o produto da fração volumétrica desta fase pela propriedade média no volume de controle. Portanto a propriedade média no volume de controle é dada pela Equação (2.8).

$$\langle \psi \rangle = \alpha_k \langle \psi \rangle_k \quad (2.8)$$

Assim, para cada fase do sistema, as equações da continuidade e de conservação de momento linear podem ser escritos como nas equações (2.9) e (2.10) respectivamente.

$$\frac{\partial \alpha_k \langle \rho_k \rangle_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \langle \rho_k \bar{u}_k \rangle_k = \sum_{i=1, i \neq k}^{NF} \mathcal{M}_{i,k} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \langle \rho_k \bar{u}_k \rangle_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \langle \rho_k \bar{u}_k \cdot \bar{u}_k \rangle_k + \nabla \cdot \alpha_k \langle \bar{T} \rangle_k = \alpha_k \langle \rho_k \bar{F}_k \rangle_k + \sum_{i=1, i \neq k}^{NF} \mathcal{F}_{i,k} \quad (2.10)$$

Como já mencionado anteriormente, os termos de transferência de massa ($\mathcal{M}_{i,k}$) da equação (2.9) e de transferência de *momentum* ($\mathcal{F}_{i,k}$) da equação (2.10) precisam ser modelados dando origem às equações de fechamento. Por exemplo, o termo $\mathcal{M}_{i,k}$ de transferência de massa entre as fases pode ser modelado com base em fenômenos de cavitação, evaporação ou algum outro fenômeno de transferência de massa.

Quando o sistema está submetido a um campo elétrico, uma força de campo atua sobre as partículas de fluido dependendo de suas propriedades elétricas. A força por unidade de volume de um fluido incompressível é dado pela equação de Korteweg-Helmholtz, Equação (2.11), na qual foi omitido o termo de eletrostrição. Eletrostrição é a deformação elástica produzida num sólido dielétrico quando sobre este age um campo elétrico.

$$\vec{F} = \rho_c \vec{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon \quad (2.11)$$

A primeira parcela da Equação (2.11) representa a força de campo devido à interação da carga líquida do fluido com o campo elétrico. O último termo contabiliza a não homogeneidade da permissividade do meio. Considerando um material dielétrico linear é possível reescrever a força eletrostática conforme a Equação (2.12).

$$\vec{F} = \nabla \cdot \left[\varepsilon \vec{E} \vec{E} - \frac{1}{2} \varepsilon \vec{E} \cdot \vec{E} \vec{I} \right] \quad (2.12)$$

O termo que aparece entre colchetes é um tensor conhecido como tensor de Maxwell. Esta força pode ser adicionada à Equação (2.3) para simular o efeito de campo elétrico sobre o sistema.

2.2.2. Abordagem Euleriana-Lagrangeana

Nos modelos baseados na abordagem Euleriana-Lagrangeana, um único conjunto de equações de conservação é resolvido para a fase contínua. A representação da fase dispersa é feita usando-se partículas pontuais, cujas trajetórias são acompanhadas ao longo do tempo. Matematicamente, a descrição Lagrangeana fornece a posição de cada partícula de fluido a todo instante de tempo (HAUKE, 2008). Desta forma, a aceleração de cada partícula de fluido é calculada com base na cinemática de corpos rígidos. Portanto a 2ª Lei de Newton do movimento, conforme a Equação (2.13), é resolvida para cada partícula.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \frac{(\rho_p - \rho_f) \vec{g}}{\rho_p} + \vec{f} \quad (2.13)$$

O primeiro termo à direita da igualdade representa a aceleração devido à força de arraste oriunda da interação da fase contínua sobre a partícula. O segundo termo à direita da igualdade representa a aceleração em virtude do empuxo imposto à partícula em consequência da ação da gravidade. Por último, a parcela \vec{f} da Equação (2.13) representa a aceleração devido às diversas forças de campo atuando sobre a partícula, tais como força de sustentação, massa virtual ou até mesmo forças eletrostáticas.

A força de arraste é modelada com base em um coeficiente de arraste empírico, C_D , como mostra Equação (2.14).

$$\vec{F}_D = \frac{18 \mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} (\vec{u}_f - \vec{u}_p) \quad (2.14)$$

Na Equação (2.14), o número de Reynolds é calculado com base no diâmetro da partícula, na viscosidade no meio contínuo e na velocidade relativa entre partícula e fase contínua.

A massa virtual é a força requerida para acelerar o fluido nas vizinhanças da partícula. A massa virtual pode ser expressa pela Equação (2.15).

$$\vec{F}_{MV} = \frac{\rho}{2\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u}_f - \vec{u}_p) \quad (2.15)$$

Numericamente a simulação Lagrangeana implica em resolver uma equação diferencial ordinária para cada partícula. Normalmente usam-se métodos conhecidos de integração de EDO's como o método trapezoidal ou o método de Euler, implícito ou explícito.

Outro aspecto importante do método Lagrangeano é o acoplamento entre a solução da fase dispersa à solução do escoamento da fase contínua. A interação da fase contínua sobre as partículas da fase dispersa são modeladas explicitamente pelo termo de arraste da Equação (2.13), porém pela 2ª Lei de Newton, o fluido contínuo deve experimentar uma força de igual magnitude, mas de sentido oposto àquela sentida pelas partículas. Em casos onde o escoamento é muito diluído, a força das partículas sobre a fase contínua é desprezível frente às outras forças atuando sobre a fase contínua como as de inércia, gradientes de pressão e efeitos de turbulência. Nestes casos, a modelagem é conhecida como acoplamento em uma via (POPOFF e BRAUN, 2007).

Por outro lado, quando a força devido à presença de particulado é significativa para o escoamento da fase contínua temos que considerar o acoplamento em duas vias. Nestes casos, uma fonte de *momentum* é adicionada à equação de Navier-Stokes da fase contínua para contabilizar este efeito. Esta fonte de *momentum* é calculada pela diferença de momento linear da partícula ao atravessar determinada distância, a saber, a célula computacional. Assim, pode-se calcular a fonte de momento linear devido a presença de um partícula que se desloca entre os pontos 0 e 1 conforme a Equação (2.16).

$$\vec{S}_{mom} = (m_{p1}\vec{u}_{p1} - m_{p0}\vec{u}_{p0}) \quad (2.16)$$

Se a carga de partículas for alta, isto é, alta densidade de partículas, é preciso considerar também as colisões interparticulares. Os modelos de colisão são derivados das equações de conservação de massa das gotículas, momento linear e energia entre antes e depois da colisão (KO e RYOU, 2005).

2.2.3. Modelos de colisão interparticular

Uma vez que é determinada a colisão de duas partículas o algoritmo de colisão decide o efeito de cada colisão. Após uma colisão podem ocorrer os seguintes fenômenos: reflexão, separação elástica, quebra ou coalescência. Quando duas partículas colidem uma na outra, o fluido entre elas é comprimido e a pressão neste filme aumenta. Se a velocidade relativa das partículas não é grande o suficiente para vencer esta força, as partículas efetivamente não se tocam e se separam. Este fenômeno é chamado de reflexão. Por outro lado, se a velocidade relativa de aproximação de duas partículas for maior, as partículas colidem, o filme interfacial rompe e ocorre a coalescência. Porém, em altos números de Weber, o excesso de energia cinética das partículas pode causar a quebra ou separação elástica (KO e RYOU, 2005). A Figura 2.7 mostra os diferentes resultados de uma colisão entre partículas.

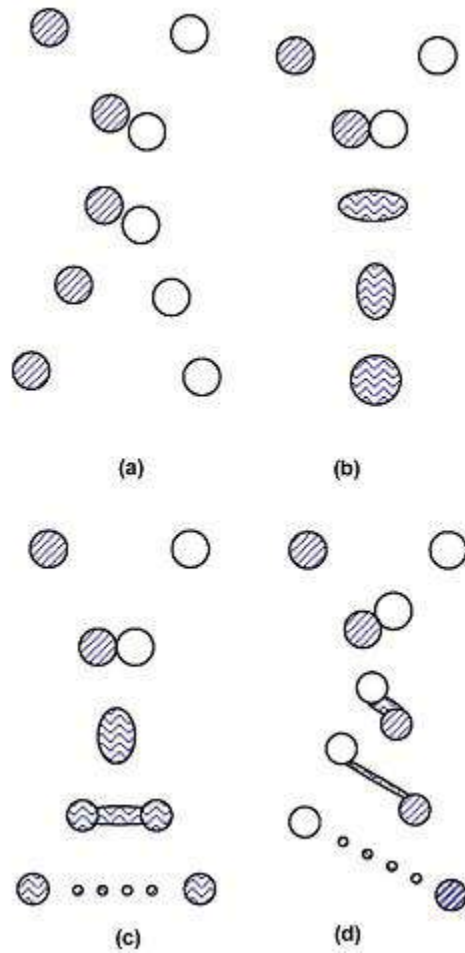


Figura 2.4 - Diagrama de efeitos de colisão: (a) reflexão, (b) coalescência, (c) quebra, (d) separação elástica.

O efeito de uma dada colisão é normalmente estimado considerando-se três parâmetros adimensionais: o número de Webber, Equação (2.17), a razão de diâmetros das partículas, Equação (2.18), e um parâmetro de impacto, Equação (2.19).

$$We = \frac{\rho D_1 |\vec{u}_{rel}|^2}{\sigma} \quad (2.17)$$

$$\Delta = \frac{D_1}{D_2} \quad (2.18)$$

$$b = \frac{2B}{D_1 + D_2} \quad (2.19)$$

Nas equações (2.17), (2.18) e (2.19), os subscritos 1 e 2 referem-se a menor e a maior partícula respectivamente. O parâmetro B da Equação (2.19) é calculado conforme mostra a Figura 2.5.

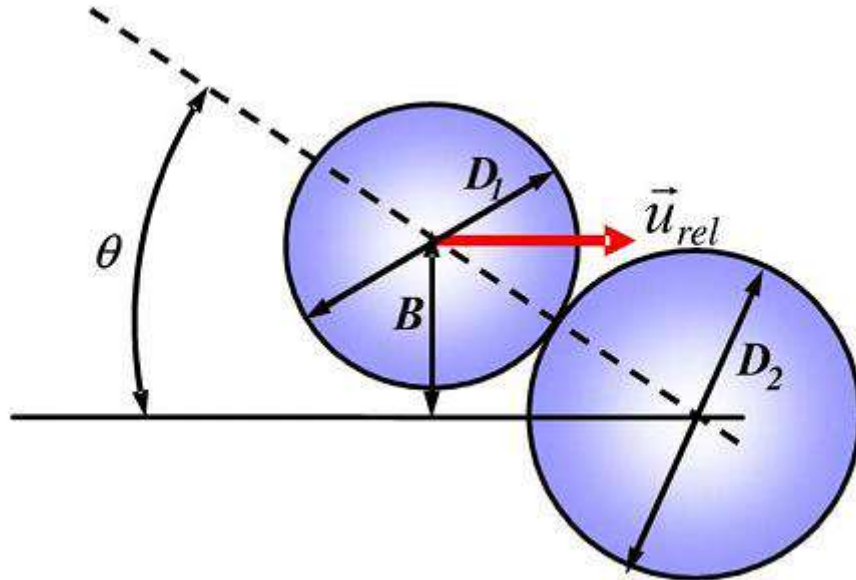


Figura 2.5 - Descrição dos parâmetros envolvidos na colisão de duas partículas.

O pacote comercial ANSYS Fluent possui um modelo de colisão computacionalmente eficiente para estimar a frequência de colisão entre partículas e seus efeitos. Uma vez que o tamanho médio de gotículas de uma emulsão é da ordem de grandeza de micrômetro, um pequeno volume de amostra pode conter milhões de partículas. Para contornar este problema o ANSYS Fluent usa o conceito de parcelas, no qual uma parcela representa estatisticamente até 1000 partículas individuais. Dessa forma, acompanhamos as parcelas ao invés de cada partícula isoladamente.

Ainda assim, o custo computacional para cálculo de todas as possibilidades de colisão é muito grande. A cada passo de tempo existem $1/2 N_p^2$ possibilidades de colisão. Por isso, usa-se o algoritmo de O'Rourke, que ao invés de verificar se a trajetória de duas parcelas se interceptam no mesmo tempo, estima a probabilidade de duas parcelas numa mesma célula computacional se colidirem.

É importante notar que este modelo assume que somente parcelas numa mesma célula podem colidir umas com as outras. Esta simplificação faz o cálculo das colisões ser computacionalmente viável, mas causa forte dependência de malha nas simulações.

No algoritmo de O'Rourke, implementado no ANSYS Fluent, apenas coalescência e reflexão são considerados. Este modelo considera que a frequência de colisão é muito menor que o passo de tempo da partícula. Se o passo de tempo não for pequeno o suficiente, o modelo torna-se dependente do mesmo.

Como o algoritmo só prevê a reflexão e a coalescência, é aconselhável que se mantenha o número de Weber menor que 100 durante as simulações, uma vez que acima deste valor uma colisão pode resultar na quebra das partículas em partículas menores chamadas filhas ou satélites.

O modelo será derivado usando como referência a maior partícula, que será chamada de coletora. Portanto, a velocidade da partícula coletora será nula e a da partícula menor será a velocidade relativa de colisão. Considera-se um círculo perpendicular ao eixo interparticular centrado no centro da partícula coletora (partícula de maior diâmetro) de raio $r_1 + r_2$. Usando como comprimento característico o deslocamento da menor partícula em único passo de tempo é possível gerar um cilindro no qual é avaliada a probabilidade de colisão. O volume deste cilindro, conhecido como volume de colisão é definido pela Equação (2.20).

$$V_{col} = \pi(r_1 + r_2)^2 |\vec{u}_{rel}| \Delta t \quad (2.20)$$

O algoritmo de O'Rourke usa este conceito de volume de colisão para calcular a probabilidade de colisão. Considerando que existe uma probabilidade uniforme de a partícula menor estar em qualquer lugar da célula onde se encontra a partícula coletora, a probabilidade de colisão é definida como a razão entre o volume de colisão e o volume da célula. A probabilidade de a partícula coletora colidir com a partícula menor é dada pela Equação (2.21).

$$P_2 = \frac{\pi(r_1 + r_2)^2 |\vec{u}_{rel}| \Delta t}{V_{cel}} \quad (2.21)$$

Esta equação pode ser generalizada para o conceito de parcelas, onde n_1 e n_2 são o número de gotículas nas parcelas menor partícula e da coletora respectivamente. Pode-se esperar que o número médio de colisões para a parcela coletora seja dado conforme a Equação (2.22).

$$\bar{n} = \frac{n_1 \pi (r_1 + r_2)^2 |\vec{u}_{rel}| \Delta t}{V_{cel}} \quad (2.22)$$

O número real de colisões, n , não é sempre o valor médio, mas segue uma função de distribuição de probabilidade, tipo Poisson, como mostra a Equação (2.23). Portanto, o número de colisões da parcela da partícula coletora é calculado com base nesta distribuição.

$$P(n) = e^{-\bar{n}} \frac{\bar{n}^n}{n!} \quad (2.23)$$

Uma vez determinado que as parcelas colidissem e o número de colisões, os efeitos destas colisões tem que ser definidos. Se as partículas colidem de frente é mais provável que ocorra a coalescência, por outro lado se a colisão for mais oblíqua há a tendência de se observar a reflexão. Como mencionado anteriormente, a probabilidade de coalescência pode ser relacionada com o número de Weber, a razão de diâmetros, e o parâmetro de impacto. É possível relacionar um parâmetro de impacto crítico com o numero de Weber e a razão de diâmetros.

$$b_{crit} = (r_1 + r_2) \sqrt{\min\left(1, 0; \frac{2,4\xi}{We}\right)} \quad (2.24)$$

$$\xi = \left(\frac{1}{\Delta}\right)^3 - 2,4 \left(\frac{1}{\Delta}\right)^2 + 2,7 \left(\frac{1}{\Delta}\right) \quad (2.25)$$

O valor real do parâmetro de impacto, b , é dado por $(r_1 + r_2)\sqrt{Y}$, onde Y é um número aleatório entre 0 e 1. O valor calculado de b é comparado com b_{crit} e se $b < b_{crit}$ as parcelas coalescem. O número de partículas que coalescem com a parcela coletora é calculada pela Equação (2.23). As propriedades das partículas que não coalesceram são

calculadas por balanço de massa e energia cinética. Assume-se que uma fração de energia cinética é dissipada por efeitos viscosos e pela geração de momento angular. A perda de energia cinética está relacionada com o parâmetro de impacto de forma que a velocidade da partícula após a coalescência é fornecida pela Equação (2.26).

$$v_2' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 + m_1 (v_2 - v_1) \left(\frac{b - b_{crit}}{r_1 + r_2 - b_{crit}} \right)}{m_1 + m_2} \quad (2.26)$$

2.3. Eletromecânica de partículas

O ponto de partida para formular a eletromecânica de partículas é estimar a força líquida sobre um pequeno dipolo. Um dipolo consiste de duas cargas iguais e opostas colocadas a certa distância sob ação de um campo elétrico, conforme ilustra a Figura 2.6. A dedução apresentada será conforme apresentado em (JONES, 1995).

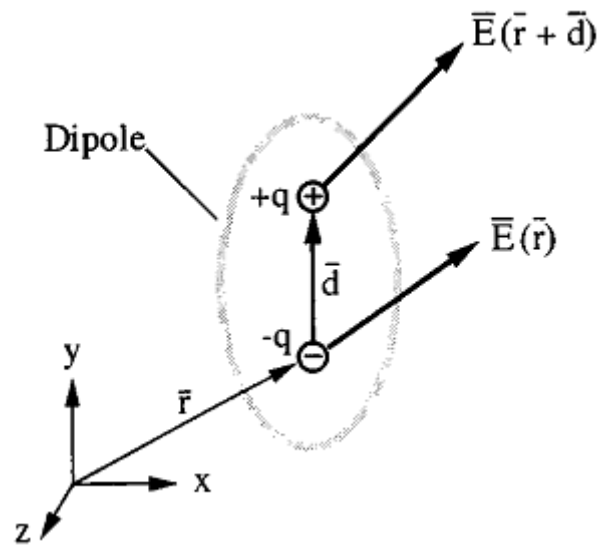


Figura 2.6 - Representação de um dipolo finito (JONES, 1995).

Pela lei de Coulomb, qualquer carga colocada em um campo elétrico experimenta uma força resultante dada pela Equação (2.27).

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2.27)$$

Portanto, a força resultante no dipolo é a soma das forças exercidas sobre as cargas pontuais, conforme a Equação (2.28).

$$\vec{F} = q\vec{E}(\vec{r} + \vec{d}) - q\vec{E}(\vec{r}) \quad (2.28)$$

Conseqüentemente, a força resultante em um dipolo é nula somente se o campo elétrico for uniforme. Por outro lado, se a distância entre as cargas do dipolo for desprezível quando comparada ao comprimento característico da não uniformidade do campo podemos simplificar a Equação (2.28), expandindo o campo elétrico em série de Taylor e truncando no primeiro termo, Equação (2.29). Substituindo na Equação (2.28) obtemos a Equação (2.30).

$$\vec{E}(\vec{r} + \vec{d}) = \vec{E}(\vec{r}) + \vec{d} \cdot \nabla \vec{E}(\vec{r}) \quad (2.29)$$

$$\vec{F} = q\vec{d} \cdot \nabla \vec{E}(\vec{r}) \quad (2.30)$$

Se no limite $|\vec{d}| \rightarrow 0$ de maneira que $q\vec{d}$ permanece finito, define-se o momento de dipolo como $\vec{p} \equiv q\vec{d}$, daí substituindo na Equação (2.30) obtemos a expressão da força em um dipolo infinitesimal conforme a Equação (2.31).

$$\vec{F} = \vec{p} \cdot \nabla \vec{E}(\vec{r}) \quad (2.31)$$

Pela Lei de Gauss é possível mostrar que

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (2.32)$$

Também podemos escrever o campo elétrico em função de um escalar (potencial elétrico) tal que

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (2.33)$$

Logo, substituindo a Equação (2.33) na (2.32) podemos calcular a forma do potencial elétrico através da Equação (2.34), a chamada equação de Poisson.

$$\nabla^2 U = - \frac{\rho_c}{\varepsilon_0} \quad (2.34)$$

Tendo calculado o potencial elétrico, o campo elétrico é facilmente obtido permitindo o cômputo das forças eletrostáticas sobre as partículas. Quando separados por grandes distâncias, a interação eletrostática entre duas gotas de água de raios R_1 e R_2 pode ser aproximada pela força atuante entre dois dipolos localizados em seus centros. Este procedimento é conhecido como aproximação dipolo-pontual.

Considerando uma gotícula esférica não carregada suspensa em um meio dielétrico. A gotícula é então submetida a um campo elétrico \vec{E}_0 . O campo externo a uma esfera dielétrica de permissividade ε_d corresponde a um campo elétrico de um dipolo colocado no centro da esfera. O valor deste momento de dipolo depende do tamanho da esfera, da permissividade e da intensidade do campo elétrico. Em razão da polarização, as gotículas terão uma distribuição de cargas na superfície, porém mantendo sua carga líquida nula. Por isso, em um campo homogêneo, a força resultante na gotícula será nula. Por outro lado, se o campo não for homogêneo a gotícula experimentará uma força maior em um dos lados e conseqüentemente se deslocará no sentido do gradiente do campo elétrico. Este fenômeno é conhecido como dieletroforese. Se a permissividade das gotas é maior que a do meio no qual está imersa a gotícula irá mover-se na direção da região com campo elétrico mais intenso. A não homogeneidade do campo elétrico pode ser imposta pela proximidade de uma carga pontual ou de outra gotícula dielétrica (CHIESA, MELHEIN, *et al.*, 2005).

A Figura 2.7 mostra esquematicamente as variáveis envolvidas no cálculo da força de interação dipolo-dipolo.

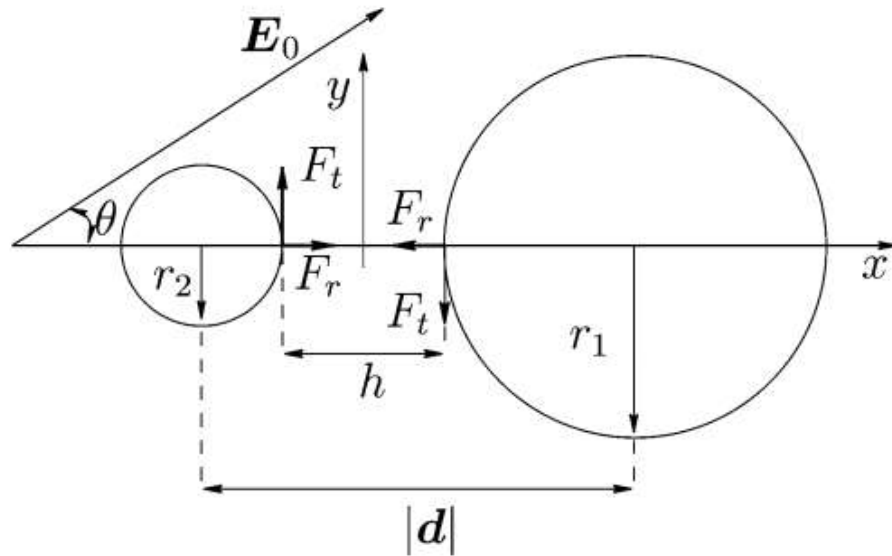


Figura 2.7 - Representação esquemática da força de atração entre duas esferas condutoras (CHIESA, MELHEIN, *et al.*, 2005).

Assim, as forças de interação podem ser decompostas em seus componentes radial e tangencial como nas equações (2.35) e (2.36), respectivamente.

$$F_r = \frac{12\pi\beta^2\epsilon_{oleo}|E_0|^2R_2^3R_1^3}{|\vec{d}|^4}(3K_1\cos^2\theta - 1) \quad (2.35)$$

$$F_t = -\frac{12\pi\beta^2\epsilon_{oleo}|E_0|^2R_2^3R_1^3}{|\vec{d}|^4}K_2\sin(2\theta) \quad (2.36)$$

Onde os coeficientes \$K_1\$ e \$K_2\$ e a função de Clausius-Mossotti (\$\beta\$) são definidos pelas Equações (2.37), (2.38) e (2.39) respectivamente.

$$\begin{aligned}
K_1 = 1 + \frac{\beta R_1^3 |\vec{d}|^5}{\left(|\vec{d}|^2 - R_2^2\right)^4} + \frac{\beta R_2^3 |\vec{d}|^5}{\left(|\vec{d}|^2 - R_1^2\right)^4} \\
+ \frac{3\beta^2 R_1^3 R_2^3 \left(3|\vec{d}|^2 - R_1^2 - R_2^2\right)}{\left(|\vec{d}|^2 - R_1^2 - R_2^2\right)^4}
\end{aligned} \tag{2.37}$$

$$\begin{aligned}
K_1 = 1 + \frac{\beta R_1^3 |\vec{d}|^3}{2\left(|\vec{d}|^2 - R_2^2\right)^3} + \frac{\beta R_2^3 |\vec{d}|^3}{2\left(|\vec{d}|^2 - R_1^2\right)^3} \\
+ \frac{3\beta^2 R_1^3 R_2^3}{\left(|\vec{d}|^2 - R_1^2 - R_2^2\right)^3}
\end{aligned} \tag{2.38}$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_{\acute{a}gua} - \varepsilon_{\acute{o}leo}}{\varepsilon_{\acute{a}gua} + 2\varepsilon_{\acute{o}leo}} \tag{2.39}$$

3. Eletrocoalescência e dessalgação

A produção de petróleo está quase sempre associada à produção de água, que pode ser de ocorrência natural ou ser oriunda de alguma técnica de recuperação secundária. Nas unidades de produção, a remoção de parte da água salina vinda da produção acontece em grandes vasos separadores. Nestes vasos com grandes tempos de residência, as gotículas de água tem tempo para sedimentar apenas em virtude da força gravitacional. Porém, é desejável diminuir o tamanho dos vasos reduzindo o tempo de residência necessário para a separação da água do petróleo. Isto é alcançado por meio da aplicação de um campo eletrostático sobre a emulsão.

3.1. Fenomenologia

O tipo de material das fases contínua e dispersa determina as forças de atração e repulsão atuantes no sistema. Os materiais, do ponto de vista da eletrostática, podem ser classificados como condutores ou dielétricos (isolantes). Os materiais condutores possuem grande quantidade de cargas livres que podem movimentar-se dentro do próprio material quando sujeito a uma diferença de potencial elétrico. A movimentação das cargas no material condutor gera uma corrente elétrica.

Por outro lado, os isolantes têm baixa ou nenhuma condutividade elétrica. Os materiais dielétricos tem a capacidade de armazenar carga na sua superfície quando uma diferença de potencial é aplicada em sua extensão. Quando uma diferença de potencial é aplicada a um material dielétrico há uma tendência de acúmulo de cargas opostas nas extremidades opostas do material. Este mecanismo de acúmulo de cargas é chamado de polarização.

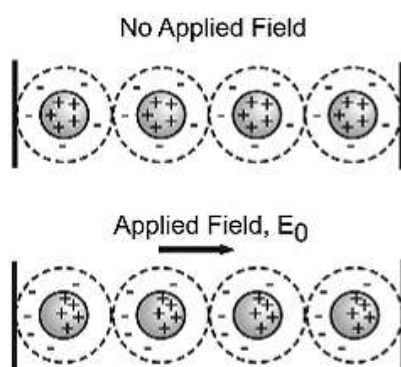


Figura 3.1 – Polarização de esferas dielétricas.

A determinação das forças eletrostáticas atuando sobre gotas de água da emulsão durante uma colisão é o primeiro passo fundamental para a modelagem da cinética da eletrocoalescência. Na presença de um campo elétrico as gotículas adquirem momento de dipolo elétrico apontando na mesma direção, e conseqüentemente, atraem umas as outras (FRIESEN e LEVINE, 1992).

O mecanismo da eletrocoalescência é dividido em três etapas sequenciais. No primeiro estágio, as gotículas se aproximam umas das outras ficando separadas por um filme líquido. O segundo estágio envolve a drenagem do filme para redução da área interfacial. No último estágio, ao atingir uma espessura crítica, o filme rompe-se e a coalescência ocorre (EOW, GHADIRI, *et al.*, 2001).

A aproximação das gotículas pode ser consequência da eletroforese, do movimento browniano ou do escoamento da fase contínua. Porém, em escoamentos turbulentos, a turbulência é o principal fator que controla a frequência de colisão entre as gotículas (MELHEIN e CHIESA, 2006). Em simulações numéricas com abordagem Euleriana-Lagrangeana, Melhein e Chiesa (2006) constataram que a intensidade de turbulência é um importante parâmetro para aumentar a frequência de colisão entre as gotículas e que campos elétricos fracos atuam somente como coadjuvante para promover a colisão das gotículas.

Em contrapartida, em escoamentos laminares, ou pouco turbulentos, a taxa de cisalhamento tem o papel dominante em colocar as gotas em contato (ATTEN, 1993). Desenvolvendo a equação do movimento de uma partícula e derivando as equações de interação entre esferas condutoras suspensas em um líquido dielétrico, Atten (1993) mostrou a importância da taxa de cisalhamento sobre as gotículas para colocá-las em contato.

Quando submetido a um campo elétrico, as gotas de uma emulsão tendem a se alinhar formando uma estrutura semelhante a um colar de pérolas. As correntes de gotas foram observadas experimentalmente tanto em campos alternados como contínuos. Nestas correntes, as gotículas são mantidas lado a lado devido à atração eletrostática entre elas. O campo elétrico polariza as gotículas, inicialmente sem cargas, e este momento de dipolo é alinhado ao campo promovendo a atração entre as gotículas (CHEN, MOHAMED, *et al.*, 1994). Chen *et al.* (1994) observaram experimentalmente o alinhamento das gotículas de água dispersas em óleo quando submetidas a um campo

AC. Nas frequências de 2-10Hz, longas correntes de gotas foram observados transversalmente aos eletrodos, porém em altas frequências (16-20Hz) observam-se correntes menores. Usando uma abordagem Lagrangeana foi possível simular numericamente a formação das correntes de gotas. Os resultados concordaram qualitativamente com os dados experimentais.

A estabilidade do filme líquido que separa duas gotículas é determinada por dois processos: estreitamento e quebra. O processo de estreitamento está intimamente ligado ao balanço de forças na interface. Um filme se torna metaestável quando as forças atrativas de van der Waals e repulsivas de dupla camada estão balanceadas. A partir deste ponto qualquer instabilidade promove a ruptura do filme líquido (EOW, GHADIRI, *et al.*, 2001).

A aplicação de um campo elétrico sobre uma emulsão também deforma as gotas que passam a ter forma elipsoidal. Isto resulta do balanço entre tensão interfacial e força eletrostática. No intuito de melhorar a eficiência de separação da precipitadora eletrostática não se pode aumentar exageradamente o campo elétrico aplicado sobre a emulsão. Dependendo das propriedades físico-químicas dos constituintes da emulsão pode existir um campo elétrico forte o suficiente para que a deformação imposta sobre a gotícula resulte em quebra da mesma (EOW e GHADIRI, 2003).

A deformação das gotículas quando submetido a um campo AC acelera a sua sedimentação e coalescência (THOMASON, BLUMER, *et al.*, 2005). Quando submetida a um campo DC, a alta voltagem, podem-se distinguir dois fenômenos: deformação contínua e histerese (BENTENITIS e KRAUSE, 2005).

Teigen, Munkejord e Bjorklund (2008) realizaram um estudo computacional sobre o processo de coalescência entre uma gota e uma superfície plana. O procedimento numérico consistiu na solução da equação completa de Navier-Stokes para cada fase, na qual a interface entre as fases foi capturada. Para incluir as forças elétricas, a equação de Poisson foi resolvida para o potencial elétrico, o qual foi usado na determinação do tensor tensão de Maxwell que é usado para contabilizar os efeitos elétricos sobre fluidos dielétricos.

Usando um modelo simplificado, Atten, Lundgaard e Berg (2006) mostram que existem condições críticas para a eletrocoalescência. Estas condições determinam a ocorrência

ou não da coalescência de duas gotas adjacentes. Neste estudo foram avaliados parâmetros como intensidade de campo elétrico (E_0), distância entre gotículas (s) e formato das mesmas (a/b) conforme mostra a Figura 3.2.

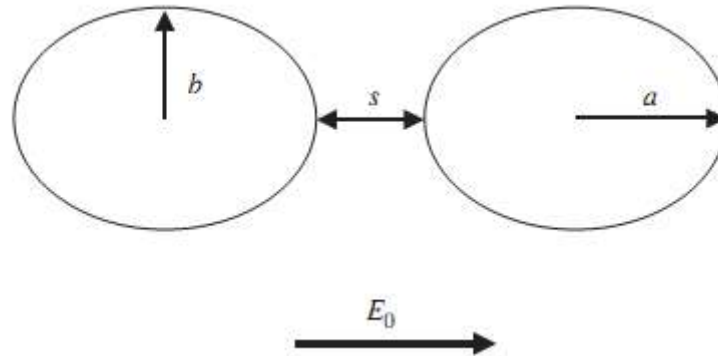


Figura 3.2 - Parâmetros críticos estudados por Atten, Lundgaard e Berg (2006).

Eow e Ghadiri (2002b) usaram um eletrocoalescedor de bancada alimentado por uma corrente pulsada para avaliar a influência do nível de água separada da emulsão e a amplitude do campo elétrico aplicado. Variando intensidade de campo na faixa de 0-4kV, a frequência de pulsação do campo entre 0,1-10Hz, e a altura do nível de água desde 8mm a até mais que 15mm, ficou evidente que existe um máximo de eficiência, chegando a aproximadamente 85% de separação, quando a distância entre o nível de água e o eletrodo é de 15mm e o campo aplicado é de 1,5kV a 0,1Hz.

3.2. Tecnologias de tratamento eletrostático de petróleos

As tecnologias de eletrocoalescência são projetadas para promover o contato e posterior coalescência das gotículas de água do petróleo com a finalidade de reduzir o tempo necessário para a separação das fases da emulsão. Os primeiros eletrocoalescedores da indústria de petróleo eram grandes vasos contendo eletrodos, divididos em uma seção de “tratamento” para o crescimento das gotas e uma seção de sedimentação para a separação das fases sob regime de escoamento laminar. Apesar de grandes tempos de residência, as eficiências de separação eram baixas e os custos elevados. Por isso, com a crescente necessidade melhorar a performance da desidratação de petróleo, novas tecnologias foram desenvolvidas e estão disponíveis no mercado (LESS e VILAGINES, 2012).

Atualmente existem várias tecnologias para promover a separação das emulsões água/óleo. Uma separação efetiva da água emulsionada em petróleos pesados é um grande desafio e geralmente envolve altos custos fixos (vasos grandes e aquecidos) e operacionais (vapor de aquecimento, deposições, agentes químicos). O uso de novas tecnologias de desidratação eletrostática tem potencial para ter maior impacto na redução destes custos (THOMASON, BLUMER, *et al.*, 2005).

As técnicas de separação baseiam-se fundamentalmente na relação da velocidade de sedimentação de uma gotícula de água suspensa no óleo com as propriedades do óleo e da água, que para um escoamento laminar de uma esfera isolada é dada pela Lei de Stokes, Equação (3.1).

$$v_p = \frac{g(\rho_p - \rho_{\text{óleo}})D_p^2}{18\mu_{\text{óleo}}} \quad (3.1)$$

Nota-se pela Equação (3.1), que é possível diminuir o tempo de sedimentação aumentando-se a diferença de densidade entre as fases, diminuindo a viscosidade do óleo ou aumentando o diâmetro das gotículas de água. Com efeito, as tecnologias de desidratação de petróleo usam métodos para alcançar estes objetivos.

Uma das técnicas muito utilizadas é o aquecimento da emulsão. Como vemos na Figura 3.3, o aumento de temperatura diminui a viscosidade do petróleo e aumenta a diferença de densidades entre óleo e salmoura.

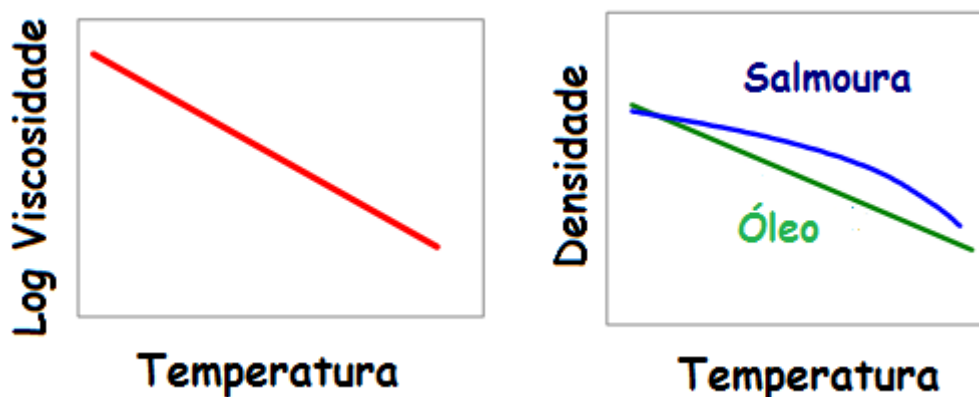


Figura 3.3- Efeito da temperatura na viscosidade do petróleo e nas densidades da salmoura e do petróleo.

Outras técnicas são usadas como, por exemplo, adição de agentes químicos tensoativos para facilitar a quebra das emulsões ou a adição de hidrocarbonetos diluentes para a redução da viscosidade de petróleos muito viscosos. Também existem patentes que usam processos híbridos ou mistos para a desidratação de petróleo. Estes processos acoplam o tratamento eletrostático a alguma outra técnica de separação. Podemos citar o uso de eletrocoalescência conjugado a centrifugação, filtração, vibração por ultrassom ou aquecimento.

Geralmente o tanque de eletrocoalescência é um tanque equipado com eletrodos, sendo que pelo menos um deles é aterrado e pelo menos outro deles é suspenso por um isolante, através do qual é aplicada a alta voltagem. Muitos tipos diferentes de campo elétrico mostraram ser eficientes na desidratação de petróleo, dentre eles podemos citar campos de corrente alternada (AC), de corrente contínua (DC), de corrente contínua e/ou alternada pulsada (EOW e GHADIRI, 2002a).

Existe na literatura uma extensa discussão sobre o impacto do tipo de campo, alternado ou contínuo, na eficiência de separação de um tratador eletrostático. A diferença de potencial aplicada na emulsão requer pelo menos um par de eletrodos, um de alta voltagem e um de baixa, geralmente aterrado. Diferentes arranjos fornecem campos contínuos (DC), alternados (AC), contínuos pulsados, ou alguma combinação deles.

Cada tipo de campo atua de acordo com diferentes mecanismos de eletrocoalescência. Campos AC tem efeito predominantemente de polarização, ao passo que efeitos eletroforéticos são mais pronunciados em campos DC. A escolha do tipo de campo a ser usado deve levar em conta a quantidade de água dispersa na emulsão, sendo campo AC geralmente usado em emulsões com alto teor de água (EOW e GHADIRI, 2002a). O campo DC é muito eficiente para pequenos tamanhos de gotas, porém seus eletrodos são muito suscetíveis à corrosão, por isso ele só é usado na desidratação de destilados com baixa condutividade. Campos combinados AC/DC tem alta tolerância teor de água do campo AC e a eficiência do campo DC (NOIK, CHEN e DALMAZZONE, 2006).

A tecnologia de desidratação com campo AC data da década de 60 e é a técnica mais difundida. Neste processo um campo alternado com frequência entre 50 e 60Hz aplicado faz com que as gotículas de água se deformem e acelerem a sua sedimentação (THOMASON, BLUMER, *et al.*, 2005). Sob ação de um campo AC, atribui-se ao mecanismo de polarização das gotículas o efeito da coalescência das gotículas de

salmoura. Normalmente usam-se eletrodos não isolados para gerar o campo AC mesmo que o teor de água seja alto. Os valores de intensidade do campo aplicado variam com o teor de água do petróleo, mas Eow e Ghadiri (2002) sugerem uma faixa entre 60 e 180kV/m.

4. Simulações numéricas

Para simular o tratamento eletrostático de emulsões água em óleo foi utilizado o pacote CFD ANSYS Fluent por ser um pacote flexível permitindo a inclusão de novas funções adequadas às necessidades particulares de cada caso. Na plataforma ANSYS Fluent é possível resolver, além das equações convencionais de conservação de massa, espécies, energia e momento linear, equações de transporte de escalares genéricos definidos pelo usuário (*User Defined Scalars - UDS*). Também é possível customizar ou adicionar novas funcionalidades à plataforma através de funções definidas pelo usuário chamadas de *User Defined Functions (UDF's)*. Com estes recursos é possível incluir efeitos elétricos nas simulações fluidodinâmicas utilizando uma única plataforma.

4.1. Descrição do caso base

Eow e Ghadiri (2002) desenvolveram um eletrocoalescedor compacto de laboratório e investigaram a influência do diâmetro médio inicial das gotículas, da frequência de corrente, e da magnitude da diferença de potencial aplicada aos eletrodos na eficiência de separação do equipamento. Em seus experimentos Eow e Ghadiri (2002) utilizaram óleo de girassol e água cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4.1, estas propriedades foram utilizadas em todas as simulações.

Tabela 4.1 - Propriedades dos fluidos.

Material	Viscosidade Pa.s	Tensão superficial (a 20°C) mN/m	Densidade kg/m ³
Água	1,14E-03	45	998
Óleo de girassol	4,72E-02	34	922

A Figura 4.1 mostra o eletrocoalescedor de bancada e a geometria simplificada usada nas simulações.

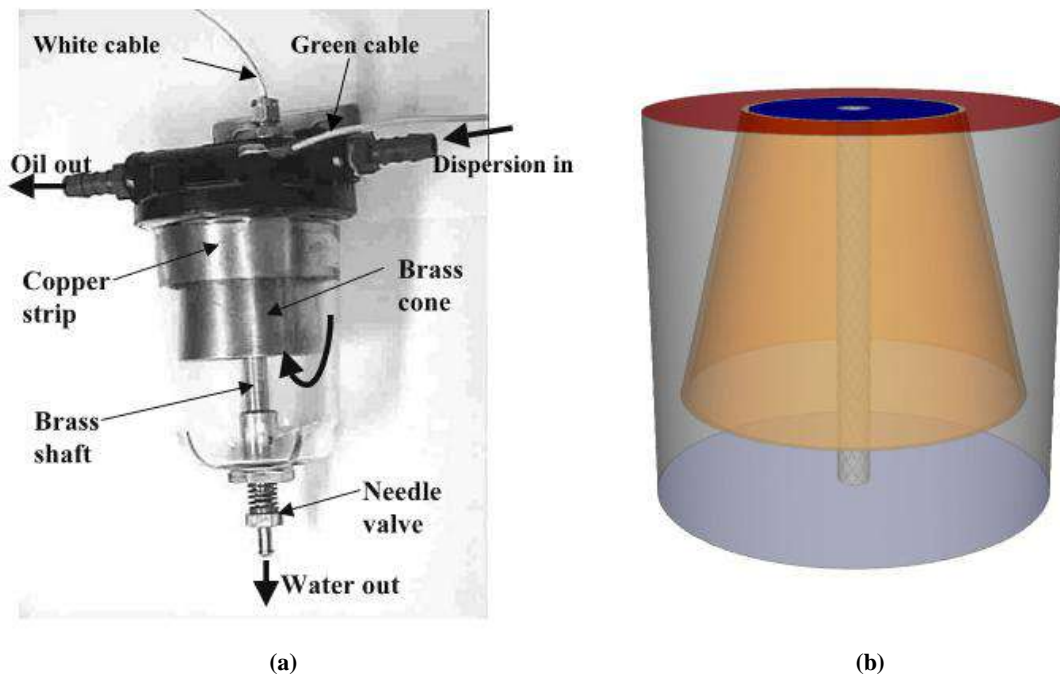


Figura 4.1- Geometria (a) real e (b) modelada do eletrocoalescedor de Eow e Ghadiri (2002).

Por fim, uma bateria de casos variando o diâmetro médio inicial de gotas e diferença de potencial nos eletrodos foi realizada a fim de simular numericamente a eficiência de separação e compará-la com os dados experimentais fornecidos por (EOW e GHADIRI, 2002b). Foram simulados casos com 0,5kV, 1,0kV e 1,5kV e com diâmetro inicial de gota de 1,0mm.

A emulsão entra pela região anular e sai pela abertura superior da geometria, o *overflow*. O *overflow* é mantido a pressão atmosférica. Na base do recipiente coletor do equipamento existe uma camada de água acumulada que é mantida sempre no mesmo nível com auxílio de uma válvula agulha que coleta as gotículas de água separadas da emulsão, por isso, na simulação a base do equipamento é considerada uma saída de partículas e não de fluido contínuo (*underflow*).

4.2. Modelos e condições de contorno

A solução do campo elétrico foi implementada através uma UDS na qual o escalar a ser transportado é o potencial elétrico. A equação completa de transporte de escalar resolvida pelo pacote ANSYS Fluent é definida como na Equação (4.1).

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi_k) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla \phi_k) + S_{\phi_k} \quad (4.1)$$

Comparando esta equação com a equação de distribuição de potencial, Equação (2.34), vemos que o potencial elétrico é um escalar que segue uma equação de transporte com fluxo convectivo nulo, em estado estacionário, cujo termo fonte é a densidade de cargas e o coeficiente de difusividade é permissividade do meio.

Como sabemos é preciso definir as condições de contorno para a solução da Equação (2.34), assim é possível resolver o problema definindo o valor ou o fluxo de potencial nas fronteiras do domínio. Neste caso são definidos os valores de potencial: o eletrodo de alta voltagem é mantido a certa voltagem constante e as demais fronteiras são mantidas aterradas, ou seja, com potencial nulo. As condições de contorno para as simulações são apresentadas na Figura 4.2 e resumidamente apresentadas na Tabela 4.2.

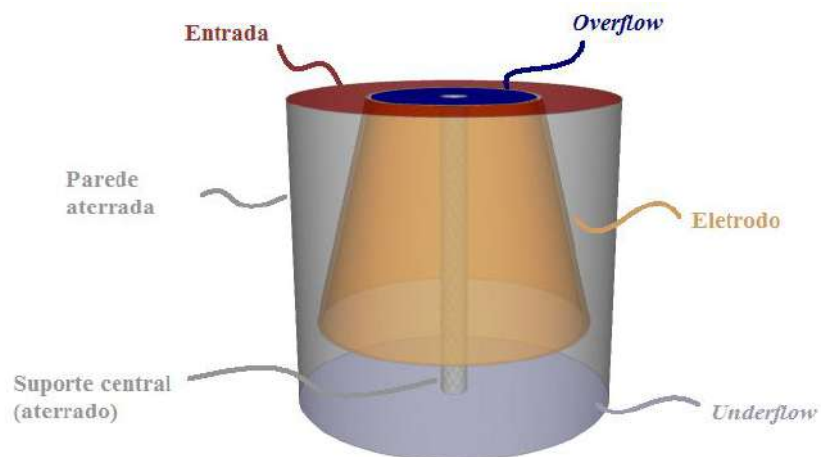


Figura 4.2- Condições de contorno usadas nas simulações.

Tabela 4.2 - Condições de contorno.

Superfície	Condição de contorno		
	Fluido	Partícula	Potencial
Entrada	m = 0,03073kg/h	m = 8,3167E-5kg/h	Fluxo nulo
Overflow	P = 0Pa	Saída	Fluxo nulo
Underflow	Não deslizamento	Saída	U = 0V
Eletrodo	Não deslizamento	Reflexão	U = cte*
Suporte central	Não deslizamento	Reflexão	U = 0V
Parede	Não deslizamento	Reflexão	U = 0V

*Conforme o caso

A força eletrostática que atua sobre as gotículas de água suspensas num óleo dielétrico foi incluída nas simulações através de uma UDF. Com efeito, a fase dispersa foi modelada com uma abordagem Lagrangeana, assim a força devido ao campo elétrico foi contabilizado na equação de movimento de cada partícula. Todas as gotículas foram consideradas esferas eletricamente carregadas com uma carga constante, porém o efeito destas cargas não é sentido pela distribuição de potencial elétrico resolvido pela UDS. Assim, o termo fonte da UDS é sempre nulo. Com isso a distribuição de potencial elétrico pode ser calculada pela Equação (4.2).

$$\nabla^2 U = 0 \quad (4.2)$$

As gotículas experimentam uma força eletrostática da forma da Equação (2.27). Para simular o efeito da oscilação da corrente que alimenta os eletrodos, a força elétrica é modulada por uma função senoidal com frequência de 0,1Hz. Desta forma a aceleração devido às forças elétricas, Equação (4.3), é incluída na solução da fase discreta.

$$\vec{a}_{el} = -(q/m)_p \nabla U \sin(2\pi f t) \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3), f é a frequência de oscilação do campo elétrico e $(q/m)_p$ é a razão carga/massa de gota que é mantida constante. Uma estimativa para o valor da carga de uma gotícula ao entrar em contato com um eletrodo carregado é dado pela Equação (4.4) (EOW, GHADIRI, *et al.*, 2001). Assim a relação carga/massa usada nas simulações foi estimada com o valor inicial de diâmetro de gota e o campo elétrico médio.

$$Q_i = (\pi^2/6) 4\pi R_p^2 \varepsilon_o \varepsilon_a |\vec{E}_0| \quad (4.4)$$

Também as colisões interparticulares são relevantes na simulação dos tratadores eletrostáticos, portanto o modelo de O'Rourke foi utilizado nas simulações para modelar os fenômenos de colisão e coalescência entre gotículas.

4.3. Estratégias de solução

Primeiramente uma solução estacionária foi obtida para o fluido contínuo e potencial elétrico. Em seguida, inicia-se a injeção de emulsão com uma vazão constante numa simulação transiente até alcançar um regime estacionário de partículas. Para melhorar a convergência da solução, uma vez que a malha é tetraédrica, foi usado duas iterações de correção de não ortogonalidade. Este processo reduz significativamente a dificuldade de convergência associada a malhas muito distorcidas. O algoritmo de acoplamento de pressão-velocidade utilizado foi o *SIMPLEC* e a interpolação dos escalares nas faces foi o *upwind* de primeira ordem. O critério de convergência adotado foi de resíduos absolutos menores que 10^{-5} .

5. Resultados

5.1. Verificação da solução do campo elétrico

Como descrito na Seção 4.2, o potencial elétrico foi resolvido pelo Fluent pela inclusão de uma equação de transporte de escalar adicional chamada de UDS (*User Defined Scalar*). A fim de verificar esta metodologia, simulei o potencial elétrico entre duas placas planas infinitas cuja solução é analítica. O teste consiste em um domínio bidimensional quadrado, no qual dois lados opostos têm o valor prescrito de potencial e nos outros dois lados fluxo nulo (para simular placas infinitas) conforme mostra a Figura 5.1.

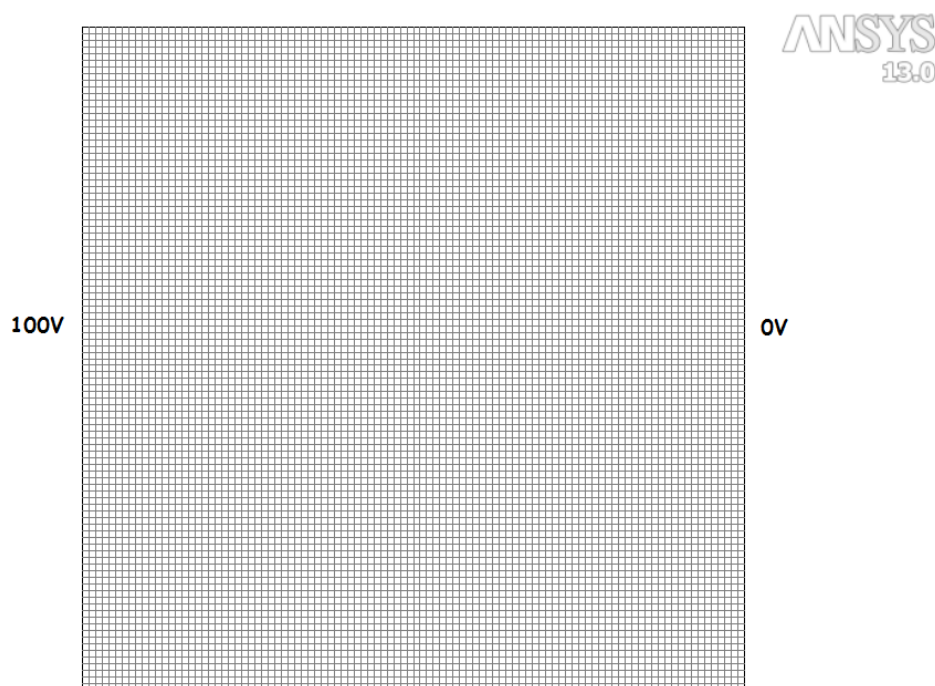


Figura 5.1- Geometria e malha para verificação da solução do campo elétrico.

O potencial elétrico entre duas placas planas infinitas, sendo uma delas aterrada, é uma reta passando pela origem com coeficiente angular igual à diferença de potencial dividido pela distância entre as placas. O campo elétrico entre as placas, dado pelo gradiente do potencial, é, portanto, constante. O resultado obtido na simulação,

apresentado na Figura 5.2, concordou com a solução analítica, portanto a metodologia está correta.

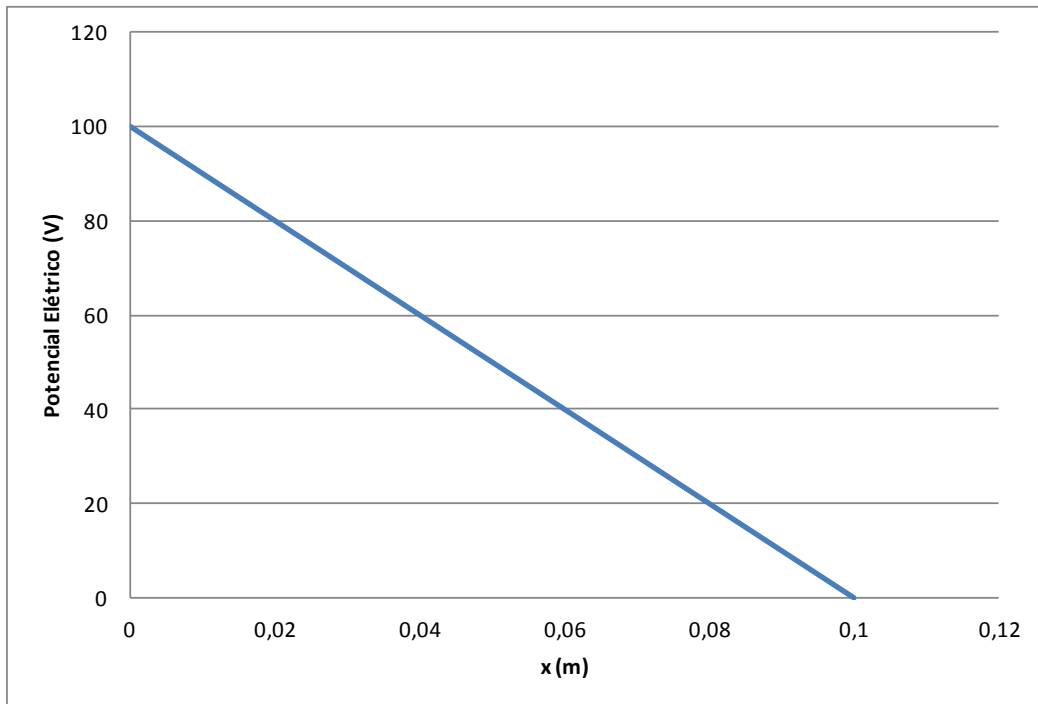


Figura 5.2 - Perfil de potencial elétrico entre duas placas planas infinitas.

5.2. Teste de convergência de malha

Tendo definido a geometria a ser estudada, realizei um teste de convergência de malha. O teste consistiu em avaliar o perfil de pressão estática e do campo elétrico ao longo de duas linhas perpendiculares dentro do domínio. Estas linhas são apresentadas na Figura 5.3. Foram avaliadas quatro malhas diferentes para ratificar a convergência de malha.

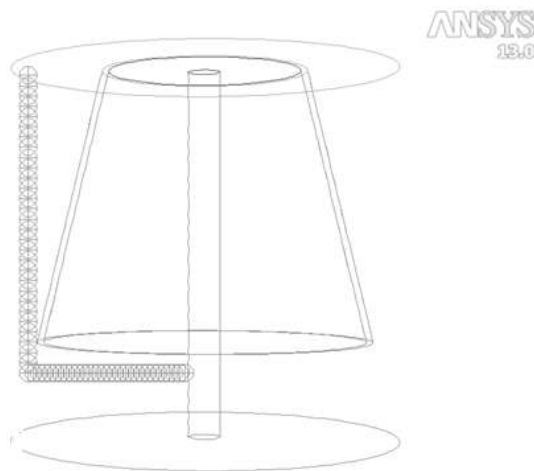
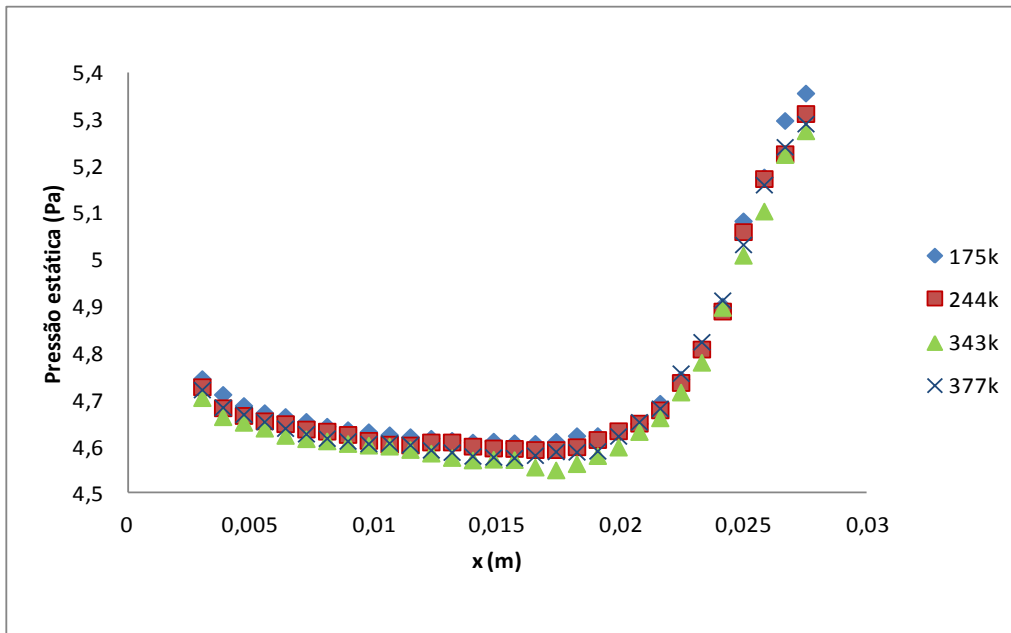
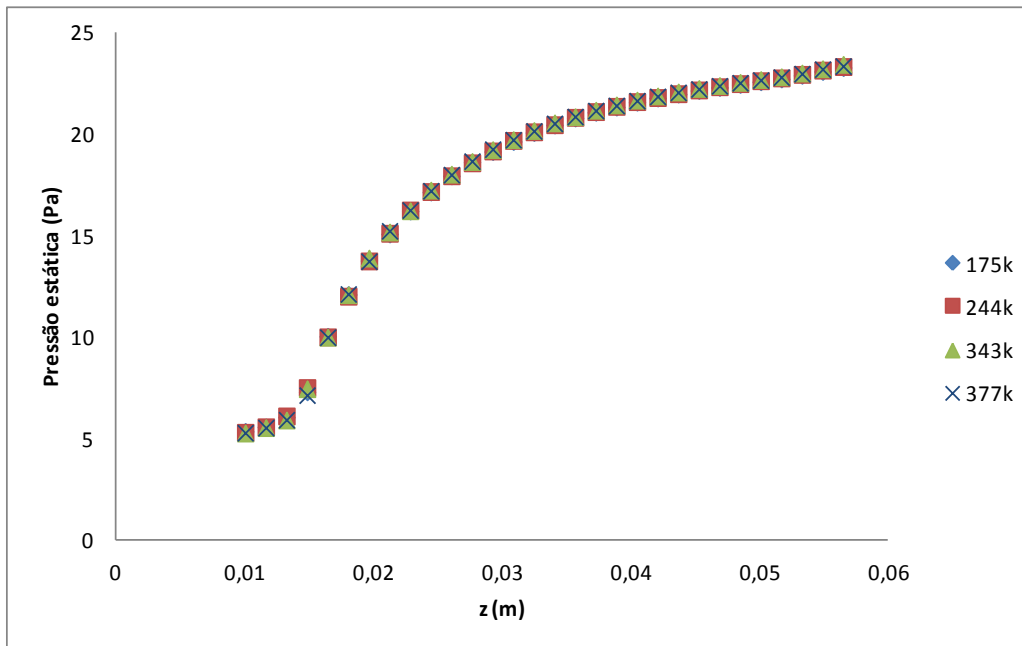


Figura 5.3- Linhas utilizadas na avaliação da convergência de malha.

Os perfis de pressão ao longo das linhas horizontal e vertical, conforme a Figura 5.4, e de campo elétrico (componente x), Figura 5.5, mostram boa convergência de resultados entre as diferentes malhas testadas. Porém, a simulação Lagrangeana é muito dependente de malha e por isso optou-se em usar nas demais simulações a malha com 244k elementos.

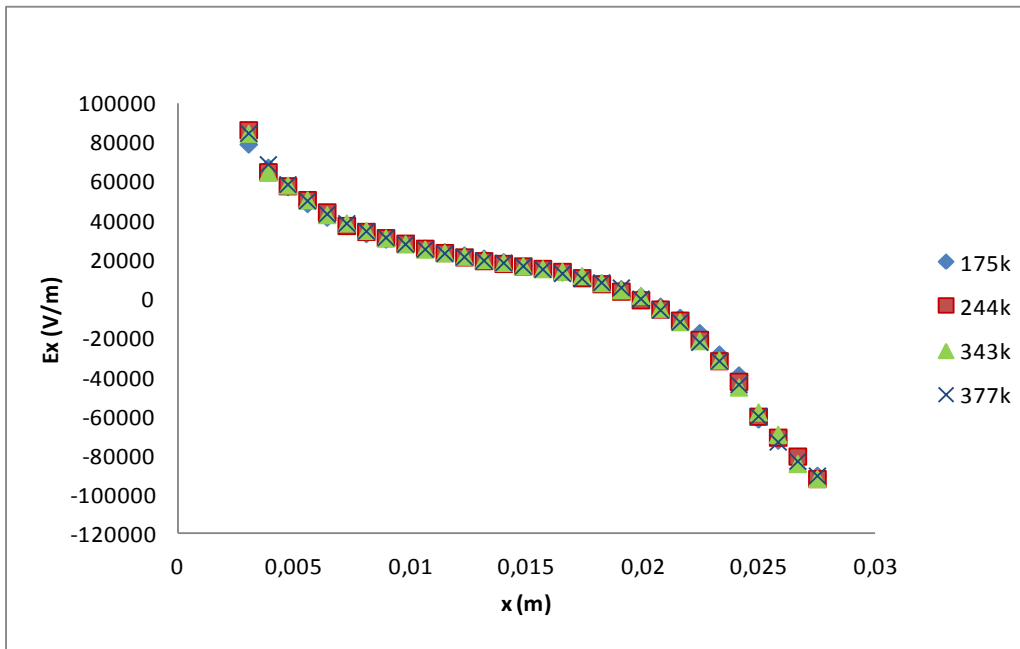


(a)

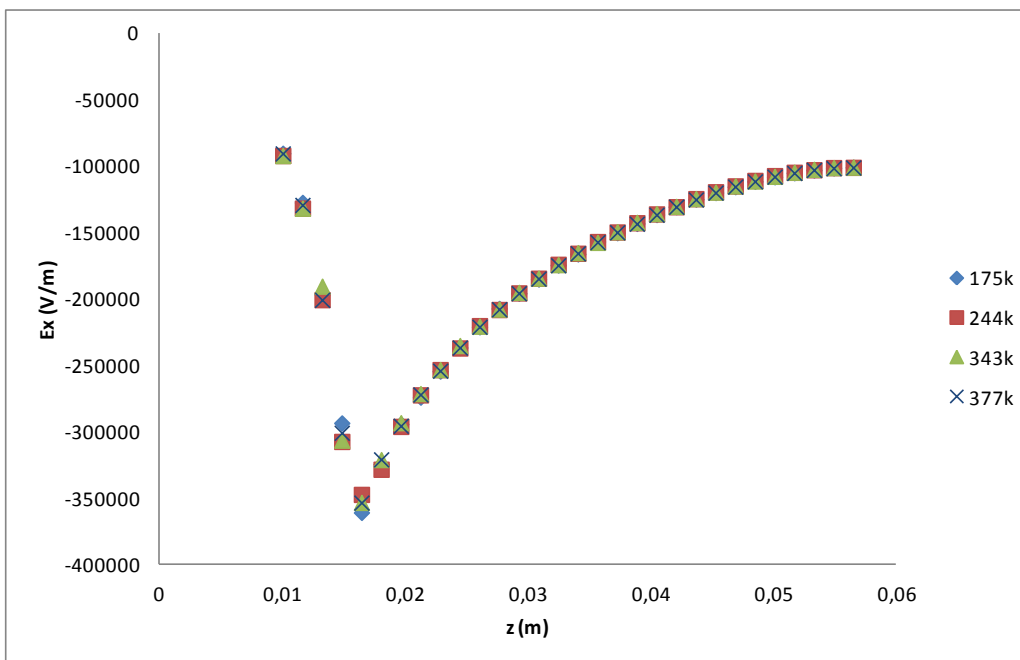


(b)

Figura 5.4- Perfil de pressão estática ao longo das linhas (a) horizontal e (b) vertical.



(a)



(b)

Figura 5.5– Perfil de campo elétrico ao longo das linhas (a) horizontal e (b) vertical.

A malha escolhida e usada em todos os casos daqui em diante, apresentada na Figura 5.6, possui mínima qualidade ortogonal de 0,21 e máxima razão de aspecto de 17,49. A qualidade ortogonal varia entre 0 e 1, na qual valores próximos de 0 correspondem a malhas com baixa qualidade. Devido à baixa qualidade ortogonal foi usada iterações de correção de não ortogonalidade conforme explicado na Seção 4.3.

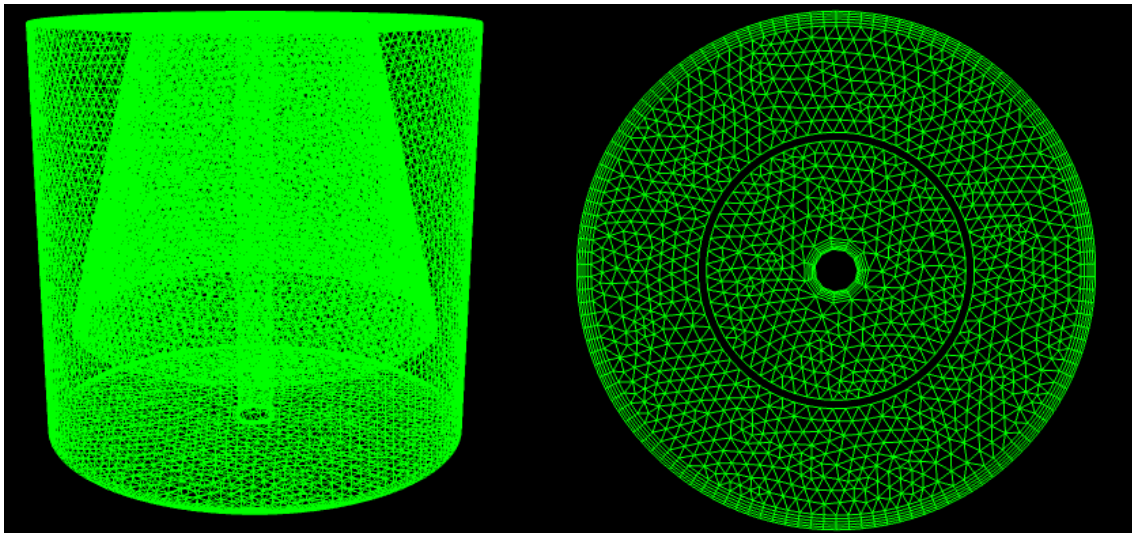


Figura 5.6– Malha utilizada nas simulações.

5.3. Simulação da curva de eficiência de separação

Com o objetivo de avaliar o impacto da intensidade de campo elétrico sobre a eficiência de separação em eletrocoalescedores contínuos foi realizada uma série de simulações apenas variando a voltagem do eletrodo. Nas simulações o perfil de fluidodinâmico da fase contínua foi mantido constante a fim de isolar o seu efeito sobre a separação e avaliar apenas a influência do campo elétrico aplicado. A Figura 5.7 mostra os contornos de velocidade no plano central do equipamento. É possível notar o aumento da velocidade nos pontos de estrangulamento, inclusive na região mais interna por onde a emulsão sai do domínio, permitindo que gotículas grandes formadas entre os eletrodos sejam carregadas para o *overflow*.

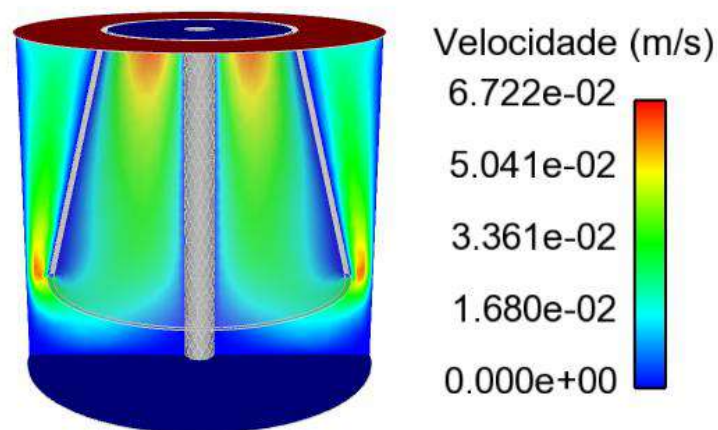


Figura 5.7 - Contornos de velocidade no plano central do domínio.

Nos casos estudados apenas a voltagem do eletrodo foi alterada sendo mantidas constantes todas as propriedades elétricas dos materiais (i.e. permissividades do óleo e da água e densidade de cargas), portanto o perfil de potencial elétrico, e consequentemente de campo elétrico, em todos os casos possui o mesmo formato, porém com valores absolutos diferentes segundo cada caso particular.

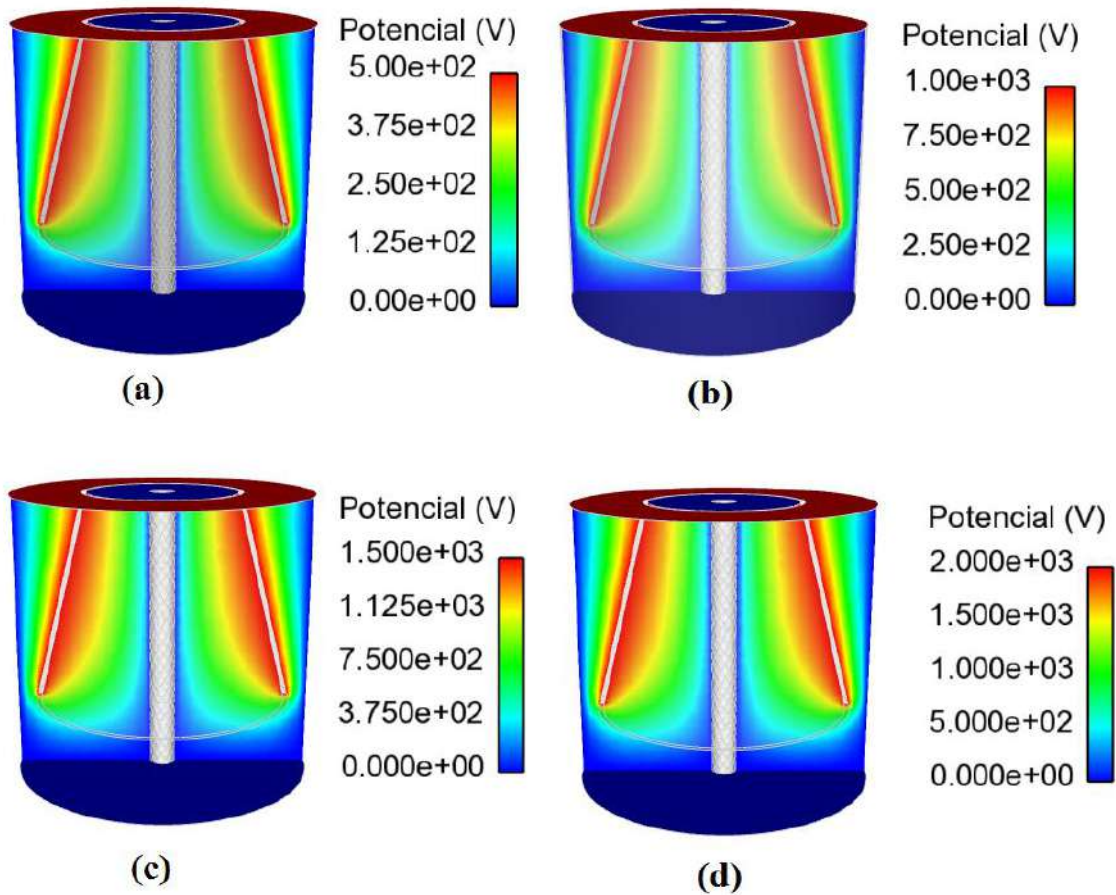


Figura 5.8 - Contornos de potencial elétrico com eletrodos a (a) 0,5kV, (b) 1,0kV, (c) 1,5kV e (d) 2,0kV.

A eficiência de separação definida como a razão entre a vazão mássica de saída no *underflow*, calculada com base na massa acumulada ao longo de um dado período de tempo, e a vazão mássica de injeção de água é dada pela Equação (5.1).

$$Eficiência_{\%} = 100 \frac{W_{underflow}}{W_{in}} \quad (5.1)$$

A Figura 5.9 mostra os resultados obtidos numericamente comparados aos dados experimentais de (EOW e GHADIRI, 2002b). Nos experimentos com voltagem acima de 1,5kV foi observado a ocorrência de curtos circuitos causando queda de eficiência de separação, porém com a modelagem usada não é possível prever curtos circuitos por isso a eficiência de separação mostra-se monotonamente crescente.

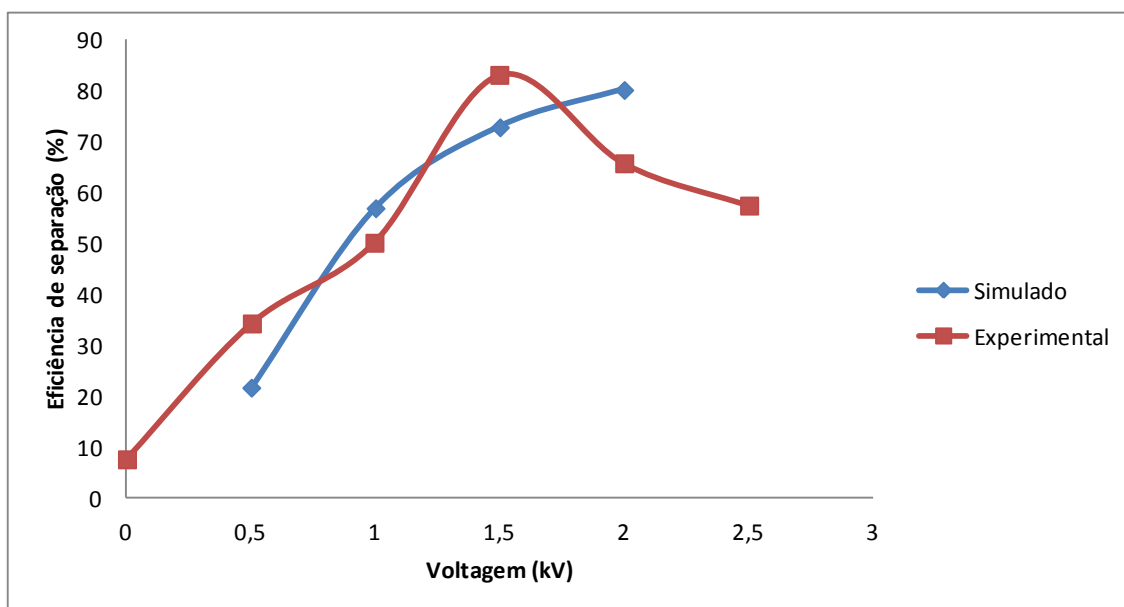


Figura 5.9 - Curvas de eficiência de separação.

É possível aproximar os resultados das simulações dos dados experimentais levando em consideração que as gotículas não são esféricas e não possuem uma carga constante. Chiesa et al. 2005 compararam diversos modelos de coeficiente de arraste para gotículas de água em óleo sendo o modelo de Le Van aquele que melhor representou os dados experimentais. Também é importante notar que um campo elétrico alternado dá origem a um campo magnético e que este atua sobre as partículas influenciando a trajetória das mesmas e conseqüentemente a eficiência de separação do eletrocoalescedor. Outro ponto relevante pode ser o fato de que em regiões do domínio com muitas gotículas carregadas juntas estas podem ter carga elétrica relevante para alterar o campo externo ao menos localmente.

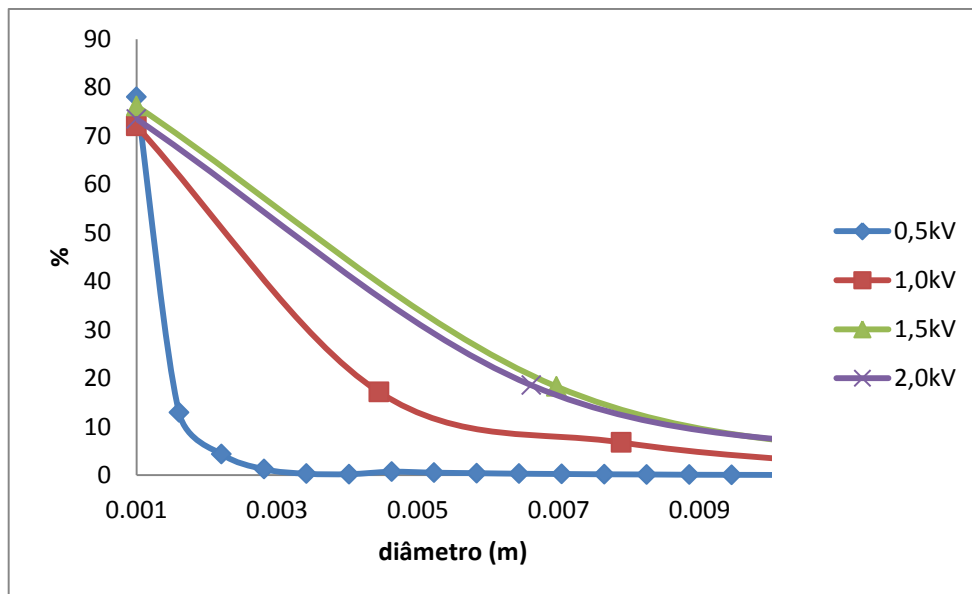
As simulações permitiram fazer uma análise de distribuição de tempo de residência e de diâmetro de gota tanto no underflow como no overflow. Estas análises, baseadas no número de partículas com dado tamanho ou tempo de residência que saíram do domínio

pelo *overflow* ou pelo *underflow*, resultaram na Tabela 5.1. Desta maneira pode-se notar um aumento do diâmetro médio de gota que saiu pelo *underflow* com o aumento da voltagem aplicada pelo eletrodo, enquanto que o tamanho de gota mantém-se praticamente inalterado no *overflow*. Outro detalhe interessante é a formação de gotas grandes na região mais interna do domínio, nesta região muitas gotículas estão confinadas juntas em um pequeno espaço provocando muitas colisões, porém a alta velocidade da fase contínua nesta região é capaz de carregar mesmo as gotas maiores em direção ao *overflow*.

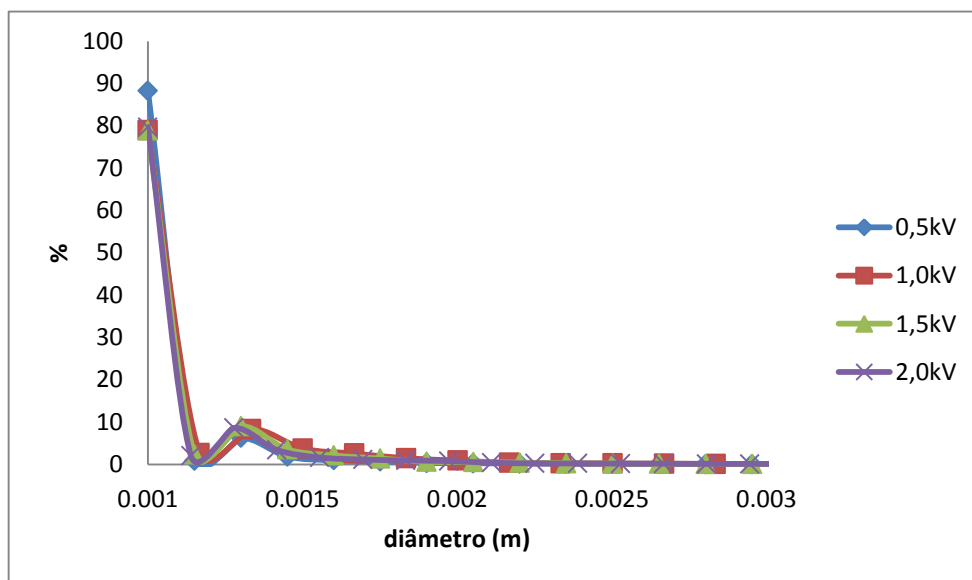
Tabela 5.1- Parâmetros da distribuição de tamanho de gota e de tempo de residência.

Voltagem	<i>Underflow</i>							
	Diâmetro (m)				Tempo de residência (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
0.5kV	0.00133949	0.001	0.018522	0.00100158	7.29554	2.8789	38.676	2.30464
1.0kV	0.00273941	0.001	0.10089	0.00347964	7.38183	2.7401	31.089	2.93865
1.5kV	0.00331246	0.001	0.17404	0.00459121	7.2384	2.534	28.976	3.28352
2.0kV	0.00362246	0.001	0.16368	0.00532655	7.2201	2.4654	28.781	3.32058
Voltagem	<i>Overflow</i>							
	Diâmetro (m)				Tempo de residência (s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
0.5kV	0.00105012	0.001	0.0053568	0.000175943	4.76107	2.9602	29.719	1.93462
1.0kV	0.00110694	0.001	0.0058416	0.000283151	5.66989	2.9619	56.655	2.36413
1.5kV	0.00110581	0.001	0.005359	0.000291213	6.04777	2.9565	31.52	2.66118
2.0kV	0.00110465	0.001	0.0050305	0.000297684	6.80907	2.9539	29.953	3.01363

As curvas de distribuição de tamanho de gota para os diversos casos simulados são mostradas na Figura 5.10. Conforme a Figura 5.10 nota-se que nas voltagens mais baixas o diâmetro de gota no *underflow* é mais sensível a variações de potencial elétrico, ou seja, as curvas de 0,5kV e 1,0kV são muito diferentes enquanto que as curvas de 1,5kV e 2,0kV praticamente coincidem. Este comportamento também é observado na curva de eficiência de separação, Figura 5.9, que mostra uma tendência à formação de uma assíntota com aumento da voltagem. Por outro lado as curvas de tamanho de gota no *overflow* não são alteradas pela voltagem.



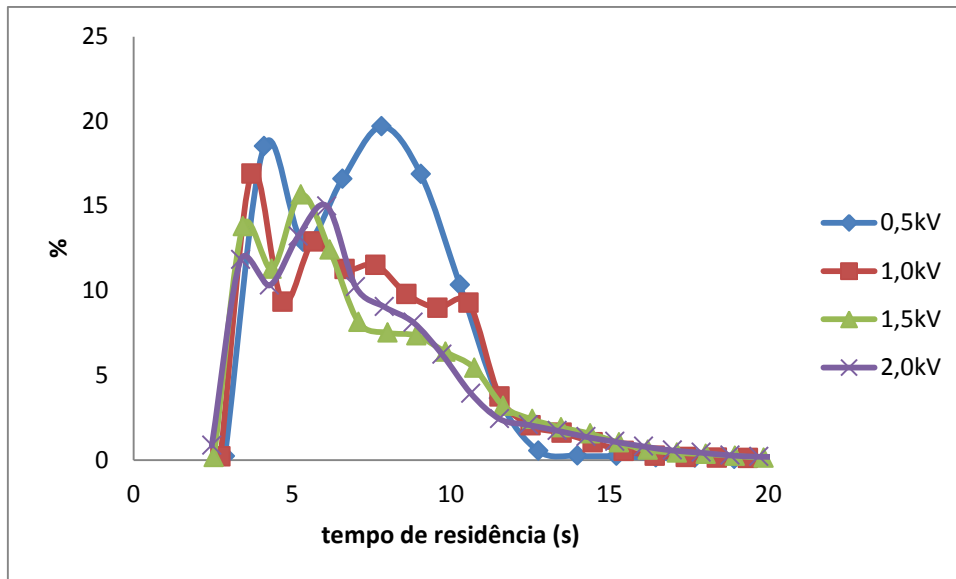
(a)



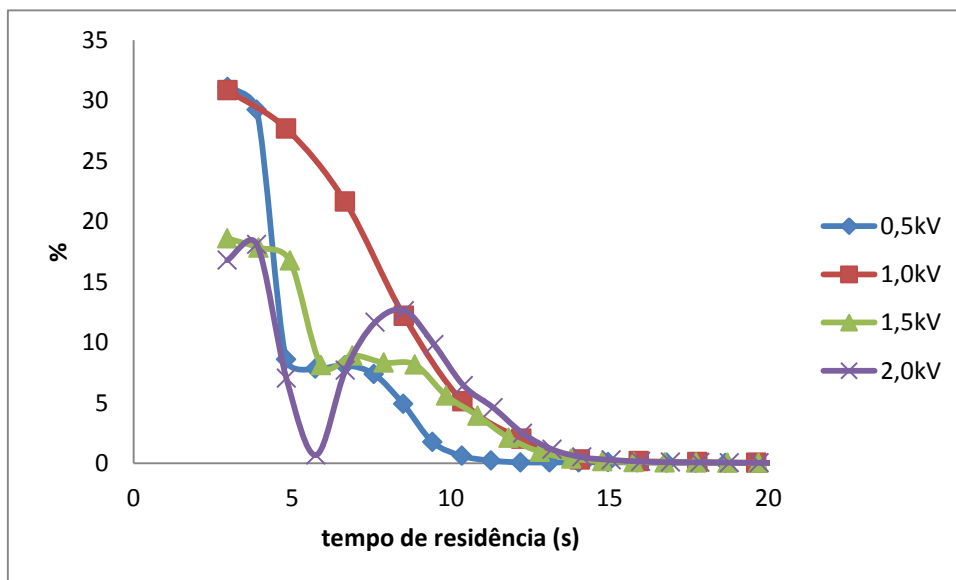
(b)

Figura 5.10– Distribuição de tamanho de gota no (a) *underflow* e (b) *overflow*.

Ao contrário do que acontece com o tamanho de gota, o tempo de residência das gotículas de água que saem pelo *underflow* é quase constante nos casos estudados e àquelas que saem pelo *overflow* possuem tempo de residência influenciado pela voltagem do eletrodo. Em ambos, *overflow* e *underflow*, observa-se um elevado desvio-padrão em relação ao tempo de residência, isto pode ser explicado pela natureza aleatória das colisões entre as gotas de água que alteram sua trajetória e afetando o tempo até alcançarem uma saída.



(a)



(b)

Figura 5.11 - Distribuição do tempo de residência no (a) *underflow* e (b) *overflow*.

Quando duas parcelas (ver Seção 2.2.3) em uma mesma célula computacional colidem o número real de colisões é calculado com base em uma distribuição de Poisson. Fazendo a integral do número de colisões, em cada caso, sobre o domínio é possível estudar o efeito do campo elétrico sobre a frequência de colisão entre as gotículas.

Conforme a Figura 5.12, é possível notar um forte impacto da voltagem sobre a frequência de colisão das partículas. No começo da injeção não há gotas de água dentro do domínio, por isso a frequência de colisão é muito pequena, após algum tempo de residência das partículas o domínio está repleto de gotículas e outras estão sendo

injetadas continuamente, desta forma o número de colisões aumenta. Nesta bateria de casos observa-se uma relação direta entre a intensidade do campo elétrico e a frequência de colisão entre as gotículas. Também é esperado um comportamento assintótico, ou seja, é possível alcançar uma voltagem limite a partir da qual um incremento de voltagem pouco altera a frequência de colisão entre as gotículas.

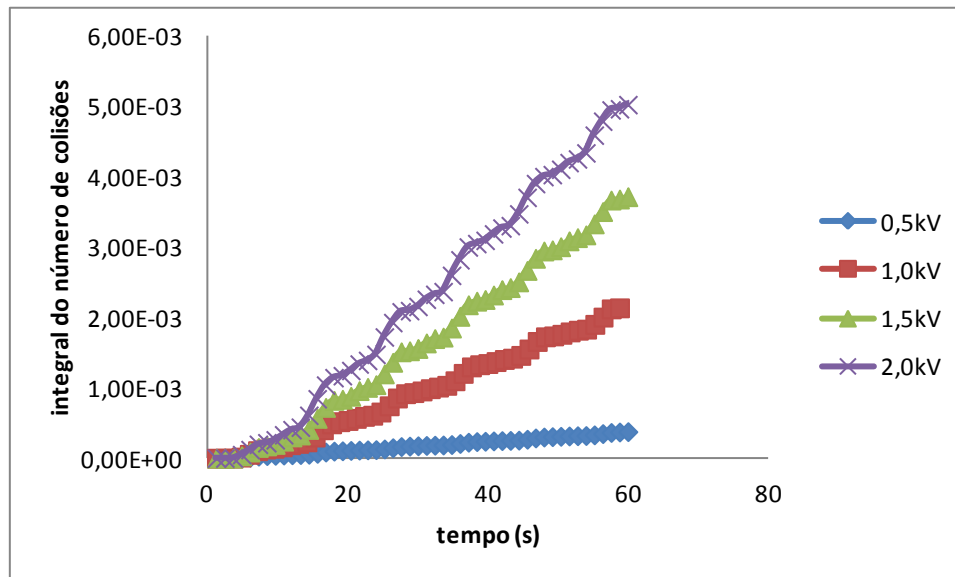


Figura 5.12 - Integral do número de colisões ao longo do tempo.

6. Conclusões

A simulação eletrostática acoplada à fluidodinâmica é indispensável para a otimização da operação dos precipitadores eletrostáticos, e tendo em vista a necessidade constante de redução do tamanho dos separadores *offshore*, onde o espaço é muito caro, simulações CFD surgem como uma ferramenta muito útil para o projeto destas unidades.

Este trabalho mostrou que é possível acoplar a solução eletrostática com a fluidodinâmica em simulações CFD. Esta abordagem é importante em diversas aplicações industriais nas quais se deseja considerar as propriedades eletrostáticas dos fluidos envolvidos, em particular na indústria de petróleo, no projeto de unidades de dessalgação de petróleos, que utilizam campo eletrostático para promover a separação óleo-água.

Os resultados numéricos concordaram qualitativamente com os dados experimentais. A eficiência de separação em um precipitador eletrostático é diretamente proporcional à intensidade do campo elétrico aplicado, porém durante a operação do equipamento devem-se evitar curtos-circuitos que diminuem drasticamente a eficiência de separação. Curtos-circuitos podem ser causados pela alta voltagem associada ao acúmulo de gotículas de água entre os eletrodos, as gotículas de água altamente condutoras formam uma espécie de corredor de alta permissividade fazendo um “contato elétrico” entre os eletrodos. Os curtos-circuitos não puderam ser observados nas simulações, porém é possível imaginar algum critério para a formação de curtos-circuitos com base na fração volumétrica da água entre os eletrodos, e desta forma seria possível prever um curto-circuito nas simulações.

Considerando uma abordagem Lagrangeana sugere-se incluir modelos de coeficiente de arraste levando em consideração a deformação das gotículas de água quando submetidas a um campo eletrostático. Também é recomendado considerar as gotículas de água carregadas como fonte de cargas nas equações de Poisson para eletrostática. Além disso, em uma análise mais profunda pode-se considerar incluir o torque imposto às partículas devido ao campo eletrostático.

Na simulação de uma precipitadora eletrostática é indispensável uma boa modelagem do fenômeno de eletrocoalescência, que fundamentalmente governa o processo de

separação das partículas. Recomenda-se em trabalhos futuros a simulação Euleriana-Euleriana acoplada com equações de balanço populacional que é uma alternativa para uma boa modelagem de fenômenos de quebra, agregação e coalescência. Nas simulações multifásicas Euleriana-Euleriana a inclusão das forças elétricas pode ser feita pela inclusão do tensor de Maxwell na equação de conservação de momento linear.

7. Bibliografia

ATTEN, P. Electrocoalescence of water droplets in an insulating liquid. **Journal of Electrostatics**, v. 30, p. 259-270, 1993.

ATTEN, P.; LUNDGAARD, L.; BERG, G. A simplified model of electrocoalescence of two close water droplets in oil. **Journal of Electrostatics** , v. 64, p. 550 – 554, 2006.

BENTENITIS, N.; KRAUSE, S. Droplet Deformation in DC Electric Fields: The Extended Leaky Dielectric Model. **Langmuir**, v. 21, p. 6194-6209, 2005.

CHEN, T. Y. et al. Emulsion resolution by the application of an electric field. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 83, p. 273-284, 1994.

CHIESA, M. et al. Forces acting on water droplets falling in oil under the influence of an electric field: numerical predictions versus experimental observations. **European Journal of Mechanics B/Fluids**, n. 24, p. 717-732, 2005.

EOW, J. S. et al. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding. **Chemical Engineering Journal**, v. 84, p. 173-192, 2001.

EOW, J. S.; GHADIRI, M. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology. **Chemical Engineering Journal**, v. 85, p. 357-368, 2002a.

EOW, J. S.; GHADIRI, M. Electrocoalesce-separators for the separation of aqueous drops from a flowing dielectric viscous liquid. **Separation and Purification Technology**, v. 29, p. 63-77, 2002b.

EOW, J. S.; GHADIRI, M. Motion, deformation and break-up of aqueous drops in oils under high electric field strengths. **Chemical Engineering and Processing**, v. 42, p. 259-272, 2003.

FRIESEN, W. I.; LEVINE, S. Electrostatic Interaction between Two Water-in-Oil Emulsion Droplets in an Electric Field. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 150, 1992.

HAUKE, G. **An Introduction to Fluid Mechanics and Transport Phenomena.** Zaragoza: Springer, 2008.

JONES, T. B. **Electromechanics of Particles.** [S.l.]: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1995.

KO, G. H.; RYOU, H. S. Modeling of droplet collision-induced breakup process. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 31, p. 723-738, 2005.

LESS, S.; VILAGINES, R. The electrocoalescers' technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 81, p. 57 –63, 2012.

MASLIYAH, J. H.; BHATTACHARJEE, S. **Electrokinetic and colloid transport phenomena.** [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

MELHEIN, J. A.; CHIESA, M. Simulation of turbulent electrocoalescence. **Chemical Engineering Science**, v. 61, p. 4540-4549, 2006.

NOIK, C.; CHEN, J.; DALMAZZONE, C. **Electrostatic Demulsification on Crude Oil: A State-of-the-Art Review.** SPE International Oil & Gas Conference. Beijing, China: [s.n.]. 2006.

OTHMER; KIRK. **Encyclopedia of Chemical Technology.** 4° Ed. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 9, 1998.

POPOFF, B.; BRAUN, M. **A Lagrangian Approach to Dense Particulate Flows.** VI International Conference on Multiphase Flows. Leipzig, Germany: [s.n.]. 2007.

SAMS, G. W.; ZAOUK, M. **The Practiced Art of Emulsion Resolution in Electrostatic Processes.** NATCO. Houston, Texas. 1999.

SAMS, G. W.; ZAOUK, M. Emulsion Resolution in Electrostatic Processes. **Energy & Fuels**, v. 14, p. 31-37, 2000.

THOMASON, T. H. et al. **Advanced Electrostatic Technologies for Dehydration of Heavy Oils.** SPE/PS-CIM/CHOA International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Calgary: SPE International. 2005.

VAFAJOO, L.; GANJIAN, K.; FATTAHI, M. Influence of key parameters on crude oil desalting: An experimental and theoretical study. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 90-91, p. 107 –111, 2012.