CARLOS MARIO GIRALDO ATEHORTÚA

**Estudo da intensificação da coalescência de emulsões de água em óleo
com a aplicação de onda estacionária de ultrassom**

São Paulo

2015

CARLOS MARIO GIRALDO ATEHORTÚA

**Estudo da intensificação da coalescência de emulsões de água em óleo
com a aplicação de onda estacionária de ultrassom**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Área de concentração: Engenharia de
Controle e Automação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Julio Cezar
Adamowski

São Paulo

2015

CARLOS MARIO GIRALDO ATEHORTÚA

**Estudo da intensificação da coalescência de emulsões de água em óleo
com a aplicação de onda estacionária de ultrassom**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Engenharia de
Automação e Controle

Orientador: Prof. Dr. Julio Cezar
Adamowski

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 08 de setembro de 2015

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

Atehortúa, Carlos Mario Giraldo

Estudo da intensificação da coalescência de emulsões de água em óleo com a aplicação de onda estacionária de ultrassom / C. M. G. Atehortúa -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

127 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Ultrassom 2.Atuadores piezelétricos 3.Ondas (Geração) 4.Processo de separação 5.Emulsão I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Ao meu pai por suas bênçãos do céu. À mulher que me deu a vida, que sacrificou tudo e mais pela minha irmã e por mim, quem me ensinou a dar sempre o meu melhor e a nunca desistir porque “para trás, nem para pegar impulso”.

A mi padre por sus bendiciones desde el cielo. A la mujer que me dio la vida, que sacrificó todo y más por mi hermana y por mí, que me enseñó a dar siempre lo mejor y a nunca desistir, porque “para atrás, ni para tomar impulso”.

AGRADECIMENTOS

Com este trabalho termino uma etapa da minha formação acadêmica e pessoal, que foi possível só pela presença de Deus e pelo acompanhamento de muitas pessoas na minha vida, para quem devo minha infinita gratidão.

À Deus, que com a sua bondade, abençoou-me com amor, saúde e a capacidade para realizar cada uma das tarefas necessárias neste processo.

Aos professores: Dr. Julio Cezar Adamowski, orientador, pela sua constância, acompanhamento e supervisão durante o mestrado. Ao Dr. Flávio Buiochi, pela solução de dúvidas e comentários sobre a pesquisa. Ao Dr. Nicolás Pérez, pela orientação no desenvolvimento do software de controle. E ao Dr. Marco Aurélio Brizzotti Andrade, por compartilhar sua experiência acadêmica. Para vocês minha admiração e respeito.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro e a confiança que depositam em cada um dos pesquisadores para realizar esta pesquisa através do convênio Petrobras/ANP-USP intitulado “Técnicas de ultrassom para quebra de emulsão água-em-óleo”.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação MCTI, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás PRH-ANP/MCTI, pelo apoio financeiro recebido através do programa PR-19.

Ao CENPES/PETROBRAS, principalmente ao Eng. Luiz Octavio Vieira Pereira, pela sua importante colaboração e ao pessoal do Laboratório de Separação Eletrostática, Rafael, Jorge e Luiz Alberto, pela ajuda na execução dos testes de coalescência em fluxo na unidade de tratamento eletrostático.

À minha mãe, irmãs, família e amigos da Colômbia. Sua lembrança, afeto e constantes conselhos me mantiveram firme em meus propósitos, fazendo de mim

uma fortaleza, e me impulsionando durante os momentos difíceis. Obrigado por sempre acreditarem em mim.

Ao Agesimaldo, que além da sua amizade, me ensinou a trabalhar no laboratório e me introduziu no mundo da pesquisa.

Ao Thiago, que além de se tornar um grande amigo, me ajudou na revisão do texto da qualificação.

Ao Timóteo, que além da sua amizade, me ajudou de maneira incondicional na fabricação das câmaras de separação acústica.

Aos meus companheiros e colegas de laboratório, Tiago e Dan, por me acolherem de uma maneira que ultrapassou quaisquer fossem as minhas melhores expectativas, e por me permitirem aprender e crescer com vocês tanto pessoalmente como academicamente.

À Ivy, meu amor, por se tornar minha companheira, pelo seu apoio constante e incondicional.

À Natasha, por se tornar numa amiga muito querida para mim, e pela ajuda na correção do meu português.

Aos técnicos Gilberto e Adilson, que contribuíram com seu conhecimento e experiência na fabricação de algumas das peças das câmaras de separação acústica.

A Wilmar, Duberney, Maryory e Yorladys, que se tornaram minha família longe de casa.

E aos muitos que ficaram fora desta pequena lista, mas que estão no meu coração por me acolherem como se fosse um brasileiro e não mais um estrangeiro. Obrigado, muitíssimo obrigado.

RESUMO

Considerando que o petróleo quando extraído dos poços em águas profundas chega a ter teor de água superior a 50% e que antes de ser enviado à refinaria deve ter uma quantidade de água inferior a 1%, torna-se necessário o uso de técnicas de redução da quantidade de água. Durante a extração do petróleo formam-se emulsões de água em óleo que são muito estáveis devido a um filme interfacial contendo asfaltenos e/ou resinas ao redor das gotas de água. Nesse trabalho é apresentada a utilização de ondas estacionárias de ultrassom para realizar a quebra dessas emulsões. Quando gotículas de água com dimensões da ordem de $10\mu\text{m}$, muito menores que o comprimento de onda, são submetidas a um campo acústico estacionário em óleo, a força de radiação acústica empurra as gotículas para os nós de pressão da onda. Uma célula de coalescência com frequência central ao redor de 1 MHz, constituída por quatro camadas sendo uma piezelétrica, uma de acoplamento sólido, uma com o líquido e outra refletora, foi modelada empregando o método da matriz de transferência, que permite calcular a impedância elétrica em função da frequência. Para minimizar o efeito do gradiente de temperatura entre a entrada e a saída da cavidade da célula, quando está em operação, foram utilizados dois transdutores piezelétricos posicionados transversalmente ao fluxo que são excitados e controlados independentemente. Foi implementado um controlador digital para ajustar a frequência e a potência de cada transdutor. O controlador tem como entrada o módulo e a fase da corrente elétrica no transdutor e como saída a amplitude da tensão elétrica e a frequência. Para as células desenvolvidas, o algoritmo de controle segue um determinado pico de ressonância no interior da cavidade da célula no intervalo de frequência de 1,09 a 1,15 MHz. A separação acústica de emulsões de água em óleo foi realizada em uma planta de laboratório de processamento de petróleo no CENPES/PETROBRAS. Foram testados a variação da quantidade de desemulsificante, o teor inicial de água na emulsão e a influência da vazão do sistema, com uma potência de 80 W. O teor final de água na emulsão mostrou que a aplicação de ultrassom aumentou a coalescência de água da emulsão, em todas as condições testadas, quando comparada a um teste sem aplicação de ultrassom. Identificou-se o tempo de residência no interior da célula de separação como um fator importante no processo de coalescência de emulsões de

água e óleo. O uso de desmulsificante químico é necessário para realizar a separação, porém, em quantidades elevadas implicaria no uso de processos adicionais antes do repasse final do petróleo à refinaria. Os teores iniciais de água na emulsão de 30 e 50% indicam que o uso da onda estacionária na coalescência de emulsões não tem limitação quanto a esse parâmetro. De acordo com os resultados obtidos em laboratório, essa técnica seria indicada como uma alternativa para integrar um sistema de processamento primário em conjunto com um separador eletrostático.

Palavras-Chave: Ultrassom. Processo de separação. Atuadores piezelétricos.

ABSTRACT

Considering that oil when extracted from the wells in deep water have water content greater than 50%, and that before to be sent to the refinery must have a quantity of water less than 1%, it becomes necessary to use water amount reduction techniques. During the oil extraction are formed water-in-oil emulsions that are highly stable due to an interfacial film containing asphaltenes and / or resins around the water droplets. This work presents the use of ultrasonic standing waves to perform that emulsion break. When water droplets with dimensions about 10 μ m, much smaller than the wavelength, are placed in a standing acoustic field in oil, the acoustic radiation force pushes the water droplets to the pressure wave nodes. A coalescing chamber with frequency about 1 MHz, with four layers comprising a piezoelectric, a solid coupling, one with the liquid, and another reflector, was modeled using the matrix transfer method, that allows calculating the electrical impedance as a function of frequency. To minimize the effect of the temperature gradient between the inlet and the outlet of the chamber cavity, when it is operating, were used two groups of piezoelectric transducers positioned transverse to the flow which are excited and controlled independently. A digital controller has been implemented to adjust the frequency and the power of each transducer. The controller has as input the modulus and phase of electrical current of the transducer and as output the amplitude of voltage and the frequency. For developed cells, the control algorithm follows an specific resonance peak within the chamber's cavity in the frequency range 1.09 to 1.15 MHz. Acoustic separation of water in oil emulsions was carried out on a laboratory oil processing plant. Tests were performed by varying the amount of the chemical demulsifier, the initial water content in the emulsion. The system flow rate was kept constant at 80 W using the control system. Residence time within the separation chamber was identified as an important factor in the water in oil emulsions coalescence process. The use of chemical demulsifier is required to perform the separation, however in large quantities, it implies the use of additional processes before the oil final transfer to the refinery. Initial water contents in the emulsion about 30 and 50% indicate that the use of the acoustic standing wave in the emulsion coalescence has not limitation on this parameter. According to the

results obtained in laboratory, this technique would be indicated as an alternative to integrate a primary processing system together with an electrostatic separator.

Keywords: Ultrasound. Separation process. Piezoelectric actuators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	– Morfologias de diferentes tipos de emulsões	30
Figura 2.2	– Etapas da separação de uma emulsão	34
Figura 2.3	– Análise da sedimentação de uma gota de água imersa em óleo	35
Figura 2.4	– Duas gotas se aproximando e colidindo	36
Figura 2.5	– A drenagem da película contínua interfacial entre uma gota e sua fase contínua	37
Figura 2.6	– A ruptura da película interfacial, por formação de uma depressão ou de uma espinha	37
Figura 3.1	– Movimento de partícula e direção de propagação da onda .	41
Figura 3.2	– Tensão mecânica em um sólido unidimensional	41
Figura 3.3	– Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal	42
Figura 3.4	– Fluxo líquido de massa na direção x para um volume espacialmente fixo	44
Figura 3.5	– Separação de partículas por força de radiação acústica gerada por uma onda estacionária	51
Figura 4.1	Representação de um ressonador piezelétrico multicamada	52
Figura 4.2	– Sistema de coordenadas para uma camada de espessura l e as suas condições de borda.	53
Figura 4.3	– Possíveis condições de contorno para um sistema de dois eletrodos	55
Figura 4.4	– Descrição de um sistema multicamada sem eletrodos	57
Figura 4.5	– Configuração de uma estrutura multicamada com dois eletrodos (E)	58
Figura 4.6	– Ressonador multicamada com um único elemento piezelétrico	61
Figura 4.7	– Análogos mecânicos de um meio ideal e um meios elástico amortecido	63

Figura 5.1	– Técnica de aplicação de ultrassom na coalescência de emulsões	66
Figura 5.2	– Design preliminar do protótipo (Recipiente, tampa e cerâmica piezelétrica)	68
Figura 5.3	– Protótipo de célula circular para verificação de modelos . . .	68
Figura 5.4	– Impedância elétrica simulada do elemento piezelétrico . . .	70
Figura 5.5	– Simulação da impedância elétrica do conjunto tampa, epóxi e cerâmica piezelétrica	71
Figura 5.6	– Simulação da impedância ressonador protótipo completo .	71
Figura 5.7	– Comparação da impedância do ressonador protótipo	72
Figura 5.8	– Comparação fase da impedância elétrica do ressonador protótipo	72
Figura 5.9	– Impedância elétrica experimental do ressonador protótipo variando a espessura da camada de acoplamento	73
Figura 5.10	– Célula para coalescência protótipo	74
Figura 5.11	– Módulo da impedância elétrica das três cerâmicas usadas na célula	75
Figura 5.12	– Fase da impedância elétrica das três cerâmicas usadas na célula	75
Figura 5.13	– Comparação da impedância elétrica da célula protótipo . . .	76
Figura 5.14	– Comparação da fase de impedância elétrica da célula protótipo	77
Figura 5.15	– Planos da onda estacionária e partículas de amido sedimentadas	77
Figura 5.16	– Montagem experimental usada	79
Figura 5.17	– Variação da potência nas frequências de análise	79
Figura 5.18	– Variação da tensão nas frequências sob análise	80
Figura 5.19	– Preparo da emulsão sintética de água em óleo	81
Figura 5.20	– Variação da coalescência da água ao longo do tempo	82
Figura 5.21	– Variação da coalescência na célula de ultrassom	83
Figura 5.22	– Variação da coalescência no recipiente de controle	83
Figura 5.23	– Potência entregue à célula durante a geração de ultrassom na célula	84

Figura 5.24	– Variação da fase da impedância durante a geração de ultrassom na célula	84
Figura 5.25	– Variação da temperatura durante o teste	85
Figura 6.1	– Técnica de aplicação de ultrassom na coalescência de emulsões em um sistema com fluxo.	86
Figura 6.2	– Célula de coalescência em fluxo	88
Figura 6.3	– Condutância elétrica da célula a temperatura ambiente (20,7 °C), e com um gradiente de temperatura entre a entrada e a saída (13,3 – 22,4 °C)	88
Figura 6.4	– Impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 1 da célula (CH1)	89
Figura 6.5	– Fase da impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 1 da célula (CH1)	90
Figura 6.6	– Impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 2 da célula (CH2)	90
Figura 6.7	– Fase da impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 2 da célula (CH2)	91
Figura 6.8	– Condutância elétrica do transdutor 1 da célula em fluxo . . .	91
Figura 6.9	– Variação de temperatura durante o teste de resfriamento .	92
Figura 6.10	– Variação da frequência dos picos de ressonância em função da temperatura	92
Figura 6.11	– Variação da amplitude da condutância dos picos de ressonância em função da temperatura	93
Figura 6.12	– Preparo da emulsão de água em óleo no CENPES	95
Figura 6.13	– Planta de processamento de petróleo com a célula de separação instalada	96
Figura 6.14	– Teor final de água na emulsão em função do tempo, com e sem aplicação de ultrassom	98
Figura 6.15	– Influência da vazão no teor final de água na emulsão em função do tempo	99
Figura 6.16	– Influência da quantidade de desmulsificante no teor final de água na emulsão em função do tempo	99

Figura 6.17	– Influência do teor inicial de água no teor final de água na emulsão em função do tempo	100
Figura C.1	– Diagrama de operação do controle de potência e seguimento de frequência	115
Figura C.2	– Faixa de operação do transdutor 1 da célula em fluxo	116
Figura C.3	– Frequência selecionada pelo sistema de controle e variação da potência fornecida pela fonte	117
Figura C.4	Diagrama de operação da eletrônica de controle	119
Figura C.5	– Versão protótipo e final da eletrônica de controle	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	– Dimensões de cada uma das camadas do protótipo	69
Tabela 5.2	– Propriedades dos materiais da célula (protótipo)	69
Tabela 5.3	– Propriedades do material piezelétrico (1MHz)	69
Tabela 5.4	– Dimensões das camadas da célula de coalescência protótipo	76
Tabela 5.5	– Valores médios obtidos na célula de coalescência protótipo em diferentes frequências de operação usando emulsão de água e amido	78
Tabela 6.1	– Dimensões das camadas da célula de coalescência com fluxo	91
Tabela 6.2	– Comparação da separação de emulsão de água em óleo com e sem a aplicação de ondas estacionárias de ultrassom	97

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
α	Coeficiente de absorção
$\beta^{(n)}$	Conjunto de autovetores
β_F	Compressibilidade do fluido
β_P	Compressibilidade da partícula
B	Módulo de elasticidade volumétrica
c	Velocidade de propagação da onda
c_F	Velocidade de propagação da onda acústica em um fluido
c_s	Velocidade de propagação da onda acústica em um sólido
c	Constante elástica
$\bar{c}$	Constante de rigidez elástica complexa
c^E	Tensor de rigidez elástica
c^D	Tensor de rigidez elástica piezelétrica
B	Módulo de elasticidade volumétrica
δ_{fluido}	Peso específico (água ou óleo)
γ	Condutividade elétrica
dx	Elemento diferencial na direção x
dy	Elemento diferencial na direção y
dz	Elemento diferencial na direção z
dV	Elemento diferencial de volume
D	Deslocamento elétrico
e	Tensor piezelétrico
E	Campo elétrico
ε^S	Tensor de permissividade elétrica
$\bar{\varepsilon}$	Constante dielétrica complexa
f	Frequência da onda
$\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2$	Fatores de Gor'kov
F	Força
F_a	Força de radiação acústica
$\emptyset$	Fator de contraste

$\varphi, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$	Potencial elétrico
Φ	Potencial de velocidade
η	Lentidão (inverso da velocidade de propagação)
I, I_1, I_2	Corrente eléctrica
$\langle I_a \rangle$	Intensidade acústica media
$\hat{j}$	Coeficiente complexo ($\sqrt{-1}$)
k	Número de onda
$\mathbf{k}$	Número de onda complexo
κ	Fator de acoplamento eletromecânico
K_A	Constante de amortecimento
K_M	Constante de mola
l	Espessura
λ	Comprimento de onda
m	Massa
M_P	Matriz de transferência
M_E	Matriz de transferência dos eletrodos
M_G	Matriz de transferência não-piezelétrica
M_{GEPE}	Matriz de transferência multicamadas
$M^{uu}, M^{uT},$ M^{TT}, M^{Tu}	Componentes puramente mecânicos da matriz de transferência
$M^{\varphi T}, M^{\varphi u},$ M^{TD}, M^{uD}	Componentes piezelétricos da matriz de transferência
$M^{\varphi D}$	Componente puramente elétrico da matriz de transferência
μ	Amortecimento viscoelástico
n	Vetores unitários
p	Pressão acústica, pressão do fluido
$\mathbb{P}$	Amplitude da onda
P	Amplitude de pressão acústica
Q	Carga eléctrica
$\mathcal{Q}, \mathcal{Q}_{eff}$	Fator de qualidade acústica e efetivo
r	Impedância acústica característica
R	Raio da partícula
ρ	Densidade

ρ_0	Densidade característica do meio
ρ_F	Densidade do fluido
ρ_s	Densidade da esfera
S	Deformação mecânica
t	Tempo
T	Tensão mecânica
T_{ij}, T_{ji}	Tensões de cisalhamento
T_{11}, T_{22}, T_{33}	Tensões normais
$\mathcal{T}$	Densidade de energia cinética
u, u_1	Deslocamento da partícula
U_a	Potencial de radiação acústica
U	Amplitude de deslocamento da onda
$\mathcal{U}_F$	Potencial do fluido
v	Velocidade da partícula
v_x	Componente da velocidade de partícula na direção x
V, V_{ap}	Tensão elétrica
V_s	Volume da esfera
ϑ	Ângulo de perda dielétrica,
x, y, z	Coordenadas cartesianas
Y	Admitância elétrica
z	Impedância acústica
ω	Frequência angular
∇	Operador gradiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	VISÃO GERAL	22
1.2	MOTIVAÇÃO	23
1.3	REVISÃO DA LITERATURA	24
1.4	OBJETIVOS	26
1.4.1	Objetivo geral	26
1.4.2	Objetivos específicos	27
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	27
2	EMULSÕES	29
2.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DAS EMULSÕES	29
2.2	PROPRIEDADES DAS EMULSÕES	30
2.2.1	Morfologia da emulsão	30
2.2.2	Inversão de fase	31
2.2.3	Distribuição do tamanho de gota e reologia	31
2.3	ESTABILIDADE DAS EMULSÕES	32
2.3.1	Sedimentação ou separação por formação de creme	34
2.3.2	Aglomerção	35
2.3.3	Coalescência	36
2.4	DESEMULSIFICAÇÃO	38
2.4.1	Desemulsificante	38
3	ONDAS ACÚSTICAS	40
3.1	TEORIA DE ONDAS ACÚSTICAS	40
3.1.1	Propagação de ondas em materiais sólidos	41
3.1.2	Propagação de ondas em meios fluidos	43
3.1.2.1	Intensidade acústica em meios fluidos	46
3.1.3	Propagação de ondas em materiais piezelétricos	47
3.2	FORÇA DE RADIAÇÃO ACÚSTICA	49
4	MODELO UNIDIMENSIONAL DE PROPAGAÇÃO	52
4.1	MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA MULTICAMADAS	52
4.1.1	Matriz de transferência piezelétrica	53

4.1.2	Matriz de transferência dos eletrodos	54
4.1.3	Matriz de transferência não-piezelétrica	56
4.2	MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA MULTICAMADAS	57
4.2.1	Matriz de transferência multicamadas com dois eletrodos	58
4.2.2	Calculo dos parâmetros T , D , u e φ em um ressonador multicamadas	60
4.2.3	Consideração sobre perdas no modelo multicamadas	62
5	ANALISE DE RESSONADORES ACÚSTICOS	66
5.1	COALESCÊNCIA DE EMULSÕES SEM FLUXO	66
5.2	PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CÉLULA RESSONANTE DE ULTRASSOM	67
5.2.1	Simulação e design preliminar do protótipo	67
5.2.2	Comparação entre resultados de simulações e dados experimentais	72
5.3	PROTÓTIPO DE CÉLULA DE COALESCÊNCIA.	73
5.3.1	Fabricação e análise	74
5.3.2	Análise de frequências de operação	77
5.4	PREPARAÇÃO DA EMULSÃO DE PETRÓLEO.	80
5.5	ANÁLISE E ENSAIOS DE COALESCÊNCIA DE EMULSÕES SEM FLUXO.	81
6	CÉLULA DE COALESCÊNCIA EM FLUXO	86
6.1	COALESCÊNCIA DE EMULSÕES COM FLUXO	86
6.2	CÉLULA DE COALESCÊNCIA EM FLUXO	87
6.2.1	Fabricação da célula de coalescência em fluxo	87
6.2.2	Caracterização da célula de coalescência em fluxo	91
6.3	CONTROLE DE SEGUIMENTO DE FREQUÊNCIA	93
6.4	PREPARAÇÃO DA EMULSÃO DE PETRÓLEO PARA TESTES COM FLUXO	94
6.5	AJUSTE DA PLANTA DE PROCESSAMENTO	95
6.6	RESULTADOS E ANÁLISE DOS TESTES DE COALESCÊNCIA DE EMULSÕES COM FLUXO	96
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	102
7.1	CONCLUSÕES	102

7.2	TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A – PLANOS PRELIMINARES DO PROTÓTIPO SEM FLUXO. TAMPA E RECIPIENTE	112
	ANEXO B – CÉLULA DE COALESCÊNCIA EM FLUXO	113
	ANEXO C – FUNCIONAMENTO DO CONTROLE DE POTÊNCIA E SEGUIMENTO DE FREQUÊNCIA	114
	ANEXO D – OPERAÇÃO DO CONTROLE DE POTÊNCIA E SEGUIMENTO DE FREQUÊNCIA	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 VISÃO GERAL

O petróleo (ou óleo cru) extraído de poços em águas profundas normalmente vem acompanhado de água, gás e de alguns sedimentos. Antes do petróleo ser enviado à refinaria, é necessário que ele atenda as especificações referentes à máxima quantidade de água presente no óleo. Tipicamente é necessário que o petróleo possua uma quantidade de água inferior a 1%. Para atender a esse requisito, o petróleo passa por um estágio denominado processamento primário, que é realizado no próprio campo de produção para retirada da água.

Em plataformas de petróleo, a separação da água livre do óleo é normalmente feita utilizando um separador gravitacional. Neste método, a água é separada do óleo através da ação da gravidade e a velocidade da separação depende principalmente da viscosidade do óleo e do tamanho das gotas de água presentes no óleo. De forma geral, quanto maior for o tamanho das gotas, maior é a velocidade de separação. Além da água livre, a água também está presente no óleo em forma de emulsão. A emulsão de água em óleo extraída de poços possui um filme interfacial contendo asfaltenos e/ou resinas ao redor das gotas de água, fazendo com que a emulsão seja estável. Para separar a água do óleo é necessário aplicar um ou mais métodos de separação para realizar a quebra de emulsão. Entre os métodos utilizados em plataformas para a quebra de emulsão estão o método eletrostático, a adição de desemulsificantes químicos e aumento da temperatura. Muitas vezes, estes três métodos são utilizados simultaneamente.

Como a primeira etapa de separação de água em óleo é normalmente feita na plataforma de petróleo, a utilização de desemulsificantes químicos e o aumento da temperatura eleva os custos de produção, principalmente em campos de petróleo mais antigos onde o petróleo extraído possui uma elevada quantidade de água. Uma forma de reduzir os custos de produção é procurar por novos métodos de quebra de

emulsão onde seja possível utilizar menores quantidades de desemulsificantes e trabalhar a temperaturas mais baixas.

Com o objetivo de reduzir a quantidade de desemulsificantes químicos durante o processamento primário de petróleo, este trabalho apresenta o estudo da utilização de ondas estacionárias de ultrassom para a quebra de emulsões de água-em-óleo. Quando gotículas de água com dimensões da ordem de $10\mu\text{m}$, muito menores que o comprimento de onda, são submetidas a um campo acústico estacionário em óleo, a força de radiação acústica faz com que elas sejam empurradas para o nó de pressão da onda, onde ocorre a coalescência das gotas. Isso faz com que o diâmetro médio das gotas aumente, facilitando a separação da água do óleo.

1.2 MOTIVAÇÃO

A extração de petróleo de águas profundas propicia a formação de misturas de água salgada com o petróleo, chamada emulsão, devido às turbulências e às quedas de pressão criadas em válvulas de estrangulamento e nas diversas geometrias das tubulações (SJOBLOM et al., 2003). Pode-se tomar como exemplo o que ocorre nos poços de petróleo do *Pré-sal* (Brasil) descobertos no ano 2007, os quais se encontram a mais de 6 mil metros de profundidade. Durante o percurso até a superfície, o óleo e a água formam emulsões com uma concentração em volume de até 50% de água no caso o *Pré-sal*.

Estas emulsões têm grande estabilidade, tornando necessário o uso de um produto químico para conseguir a separação da água. Esse elemento é denominado desemulsificante, o qual tem um alto custo e não tem seu valor agregado ao produto final, que aliado ao consumo de energia e os tempos de residência nas unidades separadoras, são fatores importantes dentro do sistema de processamento (THOMAS, 2004).

Um dos equipamentos mais usados para fazer a separação da água do petróleo é o separador eletrostático, que tem grande eficiência na coalescência apenas em concentrações de água na emulsão abaixo de 20% no volume devido ao aumento da condutividade elétrica. Para complementar essa técnica, a aplicação de ondas

estacionárias de ultrassom em coalescência de emulsões vem sendo estudada para diversas aplicações, e estudos preliminares mostram que a técnica tem potencial de aplicação na indústria de petróleo (PANGU et al., 2009; PARVASI et al., 2013).

Este trabalho tem como finalidade estudar o fenômeno da intensificação de coalescência por ultrassom por meio de simulações computacionais e de verificações experimentais utilizando câmaras ou células de ondas estacionárias sem e com fluxo de emulsão, com intuito de definir os limites, os materiais, a faixa útil de operação e o dimensionamento para o uso na indústria de petróleo.

A pesquisa faz parte do projeto "Estudo das técnicas de ultrassom para quebra de emulsão água em óleo", financiado pela Petrobras, e objetiva o desenvolvimento de novas tecnologias. O projeto teve início com a dissertação de mestrado "Aplicação do ultrassom na coalescência de emulsões água em óleo" (SILVA, 2013), cujo objetivo foi estudar a eficiência na desemulsificação de emulsões de água em óleo mediante a aplicação de força de radiação acústica através da geração de ondas estacionárias de ultrassom em células piezelétricas. Os principais testes realizados pelo autor foram feitos com células de separação estacionárias, sem fluxo. Entretanto, a emulsão de petróleo e água na etapa do processamento primário do petróleo permanece em fluxo contínuo. A fim de aprofundar os conhecimentos nessa linha de pesquisa e para atender às necessidades do projeto de pesquisa, foi feito um estudo da intensificação da coalescência das gotículas de água de emulsões de petróleo, utilizando células de separação com ondas estacionárias com a emulsão em fluxo. As principais verificações experimentais foram realizadas em uma planta piloto de processamento primário de petróleo instalada no Centro de Pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

O uso de câmaras acústicas (MANDRALIS et al., 1994; PANGU et al., 2009) e os estudos sobre campos acústicos vêm sendo realizados nas diversas áreas da engenharia gerando diversas aplicações para câmaras acústicas que fazem uso da pressão de radiação (KÖNIG et al., 1993; LEE et al., 2005; GAIKWAD et al., 2008). A força que sofre um objeto na presença de um campo acústico é conhecida como

força ou pressão de radiação acústica (KING, 1934; BARMATZ et al., 1985). Nos campos acústicos estacionários a modelagem do potencial de radiação acústica para conhecer a sua distribuição e possível operação é necessária para qualquer aplicação. São exemplos de aplicações o controle de partículas suspensas (NILSSON et al., 2004), ressonadores para a separação de partículas (TOLT et al., 1993; WOODSIDE et al., 1998; GRÖSCHL, 1998), aplicações terapêuticas (HAAR, 2007), entre outras.

Na coalescência, onde ocorre a separação da água, varias gotas se juntam para formar uma só. Posteriormente pode unir-se a um volume maior de água já coalescida denominado fase contínua, ou também pode separar pelo mecanismo de sedimentação de gotas, no qual as gotículas caem através de uma fase contínua de petróleo e se depositam no fundo (FRISING et al., 2006). A separação de emulsões líquidas auxiliada acusticamente é feita por meio das forças de radiação (PANGU et al., 2004). Mas não simplesmente a força de radiação acústica age sobre a emulsão, outras forças como as de Van der Waals, de empuxo e a força de gravidade podem também agir nas gotículas (ZHENG, 1995). Dentro dos campos acústicos, a cinética da coalescência das gotas, induzida por estas forças sobre uma emulsão, é estudada (PANGU et al., 2007; op. cit. 2009). Na indústria de petróleo, está sendo testada a utilização de tais forças com a aplicação de ultrassom a fim de melhorar as características dos resíduos de petróleo (SAWARKAR, 2009).

A medição de composição das emulsões, óleo e teor de água, pode ser feita através da utilização de técnicas tanto destrutivas ou não (PAL, 1994), sendo esta etapa importante na avaliação dos diferentes métodos de separação de emulsões. Dessa forma, o índice de coalescência também é um fator importante na indústria que tem sido estudado por Tobin et al. (1990) e Frising et al. (2008).

Separadores bifásicos e trifásicos são usados atualmente para fazer o processamento primário do petróleo. Nos separadores trifásicos, algumas vezes denominados de extratores de água livre, é feita a separação da água do petróleo cru ou desemulsificação (THOMAS, 2004). Os separadores utilizam a gravidade como princípio de funcionamento e apresentam o mecanismo de operação por coalescência de gotas.

A emulsão de água em óleo no petróleo bruto é muito estável, devido à presença de partículas de asfaltenos e resinas que encapsulam as gotículas de água (MOHAMMED et al., 1993; KUMAR et al., 2001). Existem várias técnicas usadas para aumentar a separação ou quebra de uma emulsão, tais como dispositivos com barreiras mecânicas, aquecimento, desemulsificantes químicos, eletrocoalescência, ultrassom e micro-ondas (SUN et al., 1998; EOW et al., 2002). Aliás, a separação acusticamente auxiliada de gotículas de água contidas em emulsões com óleo vem sendo estudada recentemente (PANGU et al., 2009; PARVASI et al., 2013). O progresso da separação pode ser monitorado quantitativamente por meio da absorvância óptica que apresenta diminuição acentuada pela aplicação de irradiação ultrassônica (NII et al., 2009). A medição pode ser realizada visualmente comparando-se o nível da interface entre água e óleo perante uma escala volumétrica fixa (SILVA, 2013).

Silva (2013) desenvolveu células ressonantes de ultrassom que operam em frequências próximas de 1 MHz e com uma potência máxima de 600 W/L. Com estas células, realizou diferentes ensaios em laboratório para avaliar a quebra de emulsões sintetizadas de petróleo usando um sistema de controle de frequência implementado para manter a máxima transmissão de potência elétrica para a célula ultrassônica. Os relevantes resultados obtidos nesse trabalho mostraram que a técnica empregada pode reduzir a quantidade de desemulsificante químico ou diminuir o tempo de residência, além de indicarem a necessidade de se estabelecer qual é a influência da temperatura na eficiência de desemulsificação, sendo este o principal inconveniente relatado pelo autor.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Estudar a aplicação de células (câmaras) ressonantes ultrassônicas para a intensificação da coalescência das gotículas de água de uma emulsão, estática ou com fluxo, de petróleo cru por meio de ondas estacionárias de ultrassom.

1.4.2 Objetivos específicos

- Modelar células de separação acústica para quebra de emulsões visando o projeto da célula de quebra de emulsão.
- Fabricar célula ressonante e testar o seu funcionamento na coalescência da emulsão de água em petróleo cru.
- Avaliar os parâmetros de impedância elétrica e fase nas células ultrassônicas.
- Analisar quantitativamente o efeito da força de radiação acústica no auxílio da quebra de emulsões.
- Estudar o controle e a influência da frequência de excitação na eficiência da separação.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esse trabalho visa à utilização da força de radiação produzida por ondas estacionárias de ultrassom para estimular a segregação das fases líquidas de emulsões de água em óleo. Ele está dividido em 6 capítulos, sendo que os capítulos 2 a 4 contêm a revisão teórica, os capítulos 5 e 6 apresentam a metodologia utilizada no trabalho e os resultados modelados e experimentais obtidos, e o capítulo 7 contém a conclusão. A seguir, cada um dos capítulos é descrito de forma resumida.

O capítulo 2 apresenta os conhecimentos gerais sobre as emulsões de petróleo cru e água, incluindo as formas de classificação, propriedades, condições de estabilidade e finalmente a consequência do uso de desmulsificantes químicos no processo de quebra de emulsões.

No capítulo 3, é resumido o fenômeno de propagação de ondas acústicas em líquidos e em sólidos incluindo materiais piezelétricos, além de como são refletidas e transmitidas entre as interfaces dos materiais e como sofrem atenuação.

No capítulo 4 são apresentados os conhecimentos gerais sobre o modelo matemático baseado na matriz de transferência que é utilizado para simular o comportamento de um ressonador piezelétrico multicamada. Esse modelo numérico da célula de separação acústica fornecera subsídios ao projeto da célula visando à fabricação e verificação experimental do seu funcionamento na coalescência da emulsão de água em petróleo cru.

No capítulo 5 são apresentados o método e o projeto para a análise das células ressonantes de coalescência, são avaliados os parâmetros impedância elétrica e fase nas células ultrassônicas, comparando-os com os resultados de um modelo unidimensional desenvolvido a partir da matriz de transferência, que simula o comportamento de um ressonador piezelétrico multicamada.

No capítulo 6 é apresentado o projeto de uma célula ressonante de coalescência de operação em fluxo. Além disso, será apresentada uma análise de testes de coalescência em uma planta de processamento piloto de petróleo. Devido à grande variabilidade do processo, foi necessário o desenvolvimento de um controle de potência para garantir que a transmissão de potência elétrica para a célula ultrassônica fosse estável. Além disso, foi estudada a influência da frequência de excitação na eficiência da separação.

O capítulo 7 apresenta as principais conclusões dessa dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

2 EMULSÕES

O capítulo 2 resume os conhecimentos gerais sobre as emulsões de petróleo cru e água, incluindo as formas de classificação, as principais propriedades que as caracterizam, além das condições que estabelecem a sua estabilidade e o efeito do uso de desemulsificantes no processo de quebra de emulsões.

2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DAS EMULSÕES DE PETRÓLEO

Uma emulsão pode ser definida como uma dispersão de um líquido dentro de outro líquido. Elas podem ser encontradas em vários estágios da cadeia do petróleo, a perfuração, a produção, o transporte e o processamento. A estabilidade acontece devido à presença de agentes nas interfaces entre os líquidos que podem retardar a tendência espontânea deles de se separar. Estes agentes, contidos nas águas provenientes de formações produtoras de hidrocarbonetos, apresentam sais, microrganismos, gases dissolvidos e materiais em suspensão. Na média, o teor de sais dissolvidos encontrado nas águas é de 35 g/L, sendo de três a quatro vezes superior aos valores normais da água do mar (THOMAS, 2004).

O processo de formação da emulsão é chamado de emulsificação e pode ocorrer no reservatório que contém o petróleo naturalmente, onde a água é comprimida através dos poros estreitos das paredes rochosas, usando a tensão superficial como a força motriz para a formação de gotículas esféricas. Porém isso só pode acontecer em altas pressões e temperaturas e, quando o petróleo cru é conduzido desde a cabeça do poço até o coletor ou *manifold*, normalmente existem reduções de pressão nas válvulas que produzem gradientes de pressão onde a mistura do óleo e a água pode ser intensa, o que prejudica o processo de separação (SJOBLOM et al., 2003).

A água emulsionada no petróleo causa uma série de problemas e inconvenientes no processo de produção, entre os quais estão os seguintes: corrosão e incrustações nas instalações, sobredimensionamento dos equipamentos e tubulações, consumo elevado de produtos químicos e energia, além da diminuição da vida útil dos equipamentos (THOMAS, 2004).

A estabilidade de uma emulsão refere-se à capacidade para preservar as suas propriedades durante um determinado período de tempo. A maioria das emulsões de petróleo, que são encontradas na prática, contém óleo, água e agentes emulsificantes, e apresentam um estado metaestável em que não existe coalescência espontânea das partículas.

2.2 PROPRIEDADES DAS EMULSÕES

2.2.1 Morfologia da emulsão

A morfologia de uma emulsão é o formato no qual ela se encontra em repouso. Ela é a característica mais básica de uma emulsão. As morfologias dos diferentes tipos de emulsões são apresentadas na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Morfologias de diferentes tipos de emulsões

Fonte: PEÑA, 2004

Uma emulsão pode ser classificada de acordo com a fase dispersa (interna) e a contínua (externa). A fase dispersa está geralmente presente em uma emulsão na forma de gotas esféricas (PEÑA, 2004). Neste trabalho, os dois líquidos imiscíveis envolvidos são água e óleo e os seguintes tipos podem ser nomeados (SCHRAMM, 1992):

- Óleo em água (O/W), para as gotículas de óleo dispersas em água.
- Água em óleo (W/O), para as gotas de água dispersas no óleo.

- Óleo em água em óleo (O/W/O).
- Água em óleo em água (W/O/W).

Os últimos dois tipos são chamados de emulsões múltiplas e estão presentes em casos onde as próprias gotículas dispersas contêm gotículas mais finas de uma fase separada.

2.2.2 Inversão de fase

O fenômeno de inversão de fase refere-se ao processo pelo qual as fases dispersas e contínuas de uma emulsão são invertidas ou repentinamente mudam de forma, por exemplo, de uma emulsão O/W para uma emulsão W/O ou vice-versa. Existem dois tipos de inversão de fase numa emulsão: inversão de transição e inversão catastrófica. A primeira é induzida por fatores variáveis tais como a temperatura ou o conteúdo de sal, que afetam a afinidade do surfactante com as duas fases (BECHER, 2001; BROOKS et al, 1998). Já a inversão catastrófica é produzida pelo aumento da fração de volume da fase dispersa, até que este exceda um valor específico, determinado pelo máximo empacotamento possível de gotículas monodispersas, também chamado de limite crítico de empacotamento (BERRYMAN, 1983; SCHRAMM, 1992).

Existem outros fatores que têm influência, bem como a natureza e concentração dos emulsionantes e influências físicas, tais como a temperatura ou a aplicação de cisalhamento mecânico. As características do processo de emulsificação que indicam a forma como a emulsão é feita ou modificada, ou como a formulação ou composição dela, são alterados em função do tempo ou do espaço, também podem ser considerados entre os fatores que influenciam na inversão de fase (BECHER, 1955; SALAGER, 2006).

2.2.3 Distribuição do tamanho de gota e reologia

Reologia, em geral, é definida como o estudo da deformação e do fluxo de um material sob a influência de uma tensão de cisalhamento aplicada (BARNES, 1994). Dependendo da sua composição, o comportamento reológico de uma emulsão pode

ser newtoniano ou não newtoniano. Para valores de concentração da fase dispersa entre baixos a moderados, teores até 40% de óleo em água, as emulsões apresentam comportamento newtoniano geralmente e exibem um comportamento não newtoniano quando têm maior teor na fase dispersa (SCHRAMM, 1992).

A distribuição do tamanho correspondente das gotas é uma medida estatística da fase dispersa. As dimensões das gotas nas emulsões a analisar são da ordem de 10 μm , valor obtido nas emulsões sintéticas elaboradas no Centro de Pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro, também é relatado por Schramm (1992) como valor para um sistema de emulsão típico. O tamanho das gotículas afeta também outras propriedades da emulsão, tais como a sua estabilidade e a reologia da mesma.

A distribuição de tamanho das gotas em emulsões pode ser estudada usando microscopia, fotomicrografia, vídeo-microscopia (VM), espalhamento de luz, contagem Coulter, turbidimetria, ressonância magnética nuclear (RMN) e outros (VAN RUTH et al, 2002). O tamanho das gotas de água, assim como a sua distribuição dentro da emulsão dependem de vários fatores como tensão interfacial, grau de cisalhamento, natureza do emulsificante, presença de sólidos, além das propriedades do óleo e da fase aquosa (KOKAL, 2002). Porém, apesar de o conjunto de tamanhos numa emulsão ser continua, o número de gotas é geralmente uma função de distribuição de probabilidade de dados estatísticos (PEÑA, 2004).

2.3 ESTABILIDADE DAS EMULSÕES

A estabilidade de uma emulsão refere-se à capacidade dela em preservar as suas propriedades. O petróleo contém emulsificantes naturais, tais como: os asfaltenos, resinas, bases e ácidos orgânicos, ácidos naftênicos, carboxílicos, compostos de enxofre e fenóis. Agentes emulsificantes formam uma película na interface água-óleo, o que promove a diminuição na tensão interfacial favorecendo a dispersão das gotas e a estabilização das emulsões (KOKAL, 2002).

Além dos emulsificantes naturais, podem estar presentes outros agentes emulsificantes que são adicionados ao petróleo nas diferentes etapas do processamento, entre eles estão alguns produtos químicos que são injetados no

poço como fluidos de perfuração, produtos de estimulação, inibidores de corrosão, parafinas e incrustações.

A temperatura é uma importante variável na estabilização de emulsões, podendo afetar as propriedades físicas do óleo, da água, da película interfacial e também pode alterar a solubilidade dos emulsificantes presentes nas fases óleo e água. Por um lado, o aumento da temperatura leva a redução da viscosidade do óleo, o que facilita a aproximação das gotas de água, favorecendo a sedimentação (BRADLEY, 2005). Por outro lado, a energia térmica aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura, incrementando a frequência de colisão das gotas, e consequentemente, a probabilidade de ocorrer a coalescência (KOKAL, 2002).

Na literatura científica é consenso que a distribuição do tamanho de gota influencia a estabilização das emulsões água-óleo. Geralmente, é considerado que quanto menor o tamanho das gotas da fase dispersa, água para emulsões tipo W/O, mais estável é a emulsão. A distribuição do tamanho de gotas age sobre a viscosidade da emulsão, ou seja, ela se torna mais viscosa quando as gotas são menores ou também quando a distribuição tem um tamanho uniforme. O aumento da estabilidade pode ser atribuído também às elevadas viscosidades encontradas nas emulsões com tamanhos de gotas pequenas (BECKER, 1998).

A alteração do pH da fase aquosa provocada, por exemplo, pela adição de bases e ácidos inorgânicos influencia fortemente a ionização de certos emulsificantes, modificando as propriedades físicas da película interfacial, alterando a rigidez do mesmo. O pH também pode modificar o tipo de emulsão formada, água-óleo ou óleo-água (SALAGER, 1999).

Midttun et al., (2000) apresentaram em seu trabalho o efeito do aumento da estabilidade devido ao envelhecimento de emulsões. Este princípio é atribuído ao tempo necessário para que ocorram as migrações dos asfaltenos e resinas para a interface da gota, sendo que o tempo necessário para atingir o equilíbrio é dependente do tipo e das quantidades de asfaltenos e resinas presentes.

Uma vez formadas as emulsões, estas são normalmente estáveis, mas a separação das fases líquidas envolvidas ou quebra de emulsão, é uma etapa fundamental para o processo de produção de petróleo. Existem vários processos de degradação da emulsão que conduzem a uma separação de fases. Destes mecanismos de instabilidade, Figura 2.2, estão representados esquematicamente a sedimentação ou separação, a aglomeração, a coalescência e a separação completa (PEÑA et al., 2006).

Figura 2.2 – Etapas da separação de uma emulsão

Fonte: Modificado de PEÑA, 2004

2.3.1 Sedimentação ou separação por formação de creme

O termo sedimentação é usado se as partículas são deslocadas na mesma direção em que a gravidade atua, por exemplo, é onde as gotas de água precipitam através da fase contínua (óleo) e ficam depositadas no fundo. Caso contrário, quando as partículas flutuam, o processo é referido como separação ou formação de creme, e resulta da diferença de densidade entre as duas fases líquidas. O primeiro aplica-se à maioria das emulsões W/O (sedimentação de água), enquanto o segundo se aplica à maioria das emulsões O/W (flutuação do óleo). Ditos processos são muito afetados pelo tamanho de gota, pela diferença de densidade entre as fases e pela viscosidade da fase contínua.

Figura 2.3 – Análise da sedimentação de uma gota de água imersa em óleo

Sobre um corpo imerso totalmente em um fluido é exercida uma força de empuxo ascendente que é igual ao peso do fluido deslocado. Para a gota de água representada na figura anterior, essa força de flutuação é igual ao produto da gravidade g , o peso específico do óleo $\delta_{óleo}$ e o volume de líquido deslocado que é igual ao volume da gota V_{gota} . Já o peso da gota gera uma força descendente igual ao produto da gravidade g , o peso específico da água $\delta_{água}$ e o volume da gota V_{gota} . Quando as gotas de água são muito pequenas, as magnitudes da força devida ao peso e a força de flutuação são muito similares apesar do peso específico da água ser maior que o do petróleo. Porém, quando o tamanho, ou volume, da gota aumenta, a diferença entre ambas as magnitudes das forças é suficiente para favorecer a sedimentação das gotas de água e gerar a separação de uma emulsão por diferença do peso específico.

2.3.2 Aglomeração

A aglomeração, ou agregação, ocorre quando as gotículas ficam muito próximas umas das outras e formam flocos. Em outras palavras, é o processo de formação de grupos de gotículas que são mantidas juntas sem que percam o formato inicial. O primeiro, chamado coagulação, acontece quando entre duas partículas, as forças atrativas são dominantes, formando agregados irreversíveis. Já quando a distância é maior, as gotículas podem formar agregados do tipo reversível, isto é, que podem ser dispersos novamente, e é usualmente chamado floculação (BECHER, 1996).

2.3.3 Coalescência

A coalescência é definida como a combinação de duas ou várias gotas de modo a formar uma única gota maior ou é a incorporação de gotas a sua fase continua (FRISING et al., 2006). Os processos de coalescência e sedimentação podem acontecer simultaneamente, ou seja, gotículas coalescendo durante o processo de sedimentação, ou um depois do outro, em que pequenas gotas devem crescer primeiro por coalescência antes de serem capaz de sedimentar por gravidade. Este processo é influenciado por fatores, tais como o diâmetro da gotícula, a concentração da fase dispersa (água neste caso), a viscosidade da fase continua (óleo) e a presença de surfactantes.

Vários autores (FANG et al., 2001; BAZHLEKOV et al., 2000; LOBO et al., 1993; ABID et al., 1993) concordam sobre o fato de que a coalescência ocorre em várias estágios:

- Aproximação e colisão entre duas gotas ou entre uma gota e sua fase continua (Figura 2.4),
- A drenagem da película interfacial e
- Desestabilização da película por forças de Van der Waals, a gravidade entre outras.

Figura 2.4 - (À esquerda) Duas gotas que se aproximam. (À direita) gotas colidindo. Sendo F a força de colisão agindo sobre a gota superior com a gota mais baixa imóvel.

Fonte: LOBO, 1993.

O primeiro estágio é caracterizado pela frequência de choques entre gotas, que por sua vez depende da concentração da fase dispersa e do nível de turbulência no

meio (ABID et al., 1993). A drenagem da fina película interfacial está no coração do mecanismo de coalescência (Figura 2.5), e representa o momento entre a interrupção abrupta do movimento da gota que se aproxima e a ruptura da película interfacial (PALERMO, 1991).

Figura 2.5 - Drenagem da película contínua interfacial entre uma gota e sua fase continua.

Fonte: ROMMEL et al., 1992.

A ruptura da película é quase instantânea quando comparada ao processo de colisão e drenagem. Devido às baixas velocidades de aproximação da gota e a uma forte pressão negativa de separação, o filme fica com uma saliência no centro da gota formando uma protuberância que leva à ruptura (Figura 2.6 direita).

Figura 2.6 - A ruptura da película interfacial, por formação de uma depressão (esquerda) ou de uma protuberância (direita).

Fonte: YEO et al., 2003.

Para velocidades de aproximação e interações de Van der Waals moderadas, forma-se uma depressão que causa a ruptura da borda (Figura 2.6 esquerda). Em velocidades de aproximação altas e pressão de separação negativa fraca, forma-se uma ondulação que aplaina a película posicionando as superfícies de forma quase

paralelas, o que produz a imobilização e o achatamento da película, não permitindo a ruptura (YEO et al., 2003).

2.4 DESEMULSIFICAÇÃO

De modo a satisfazer as especificações da produção de petróleo, as emulsões têm que ser separadas em suas fases originais. A coalescência da água pelo método químico é feita através da adição de um desemulsificante adequado à emulsão. Já as técnicas típicas de tratamento incluem métodos elétricos, mecânicos ou por temperatura. Neste trabalho, o foco é o auxílio mecânico da desestabilização de emulsões água-em-óleo iniciado quimicamente, com a aplicação de ondas estacionárias de ultrassom.

2.4.1 Desemulsificante

Os desemulsificantes são tipicamente agentes tensoativos poliméricos que quando adicionados às emulsões, migram para a interface óleo-água a fim de deslocar o material da superfície ativa e, assim, promover a sua ruptura. Isso também permite que as gotículas de fase aquosa sejam atraídas, colidam e se fundam (SCHRAMM, 1992).

A capacidade de separação de um desemulsificante é principalmente controlada por dois fatores: o primeiro é a sua propriedade de se misturar na água, mas não se diluir nela; o outro é a capacidade de deslocar os materiais originários que se encontram presentes nas interfaces de água-óleo e modificar as propriedades mecânicas e reológicas da película que impedem a coalescência das gotículas (KIM et al., 1996; WANG, 2004). Dessa forma, a estrutura do desemulsificante pode influenciar os fatores nomeados anteriormente. Desemulsificantes específicos são aplicados a cada tipo de emulsão do petróleo cru (KANG et al., 2006).

Dentre as propriedades que são procuradas nos desemulsificantes são destacadas as altas velocidades de absorção na interface água-óleo, o deslocamento dos emulsificantes naturais que estabilizam as emulsões e a formação de películas finas e suficientemente frágeis na interface água-óleo.

Na formulação muitos componentes podem desempenhar funções específicas no seu comportamento. Uma classificação típica dos desemulsificantes é feita de acordo com o seu peso molecular, como por exemplo, de *elevado peso molecular* maior que 10000 Da, sendo Da: Dalton ou unidade de massa atômica, $1 \text{ Da} = 1 \text{ u.m.a.} \sim 1,660540 \times 10^{-27} \text{ kg}$, e de *baixo peso molecular* menor que 3000 Da (SJÖBLOM, 2001).

Os compostos de baixo peso molecular, tais como surfactantes comuns, ajudam a separação de fases através de vários mecanismos (SJÖBLOM, 2001). Inicialmente, eles exibem uma elevada atividade interfacial e se difundem mais rapidamente do que outros componentes com peso molecular maior. Portanto, eles podem suprimir mais eficazmente os gradientes de tensão interfacial.

Moléculas com peso molecular de moderado a elevado (tipicamente 3000-10000 Da) são geralmente responsáveis pela separação de uma grande fração da fase aquosa dispersa. As moléculas penetram a película estabilizadora na interface água-óleo e alteram a sua compressibilidade e as suas propriedades reológicas, interrompendo, assim, a boa conformação dos asfaltenos absorvidos, o que favorece a coalescência (PEÑA et al., 2005).

As moléculas com peso molecular elevado atuam como flocculantes por absorção nas interfaces água-óleo ao mesmo tempo em que interagem com as moléculas adsorvidas nas interfaces das gotas próximas. Diversas partes da molécula de desemulsificante podem ser absorvidas por várias gotas produzindo a flocculação. Tal flocculação pode melhorar as taxas de sedimentação.

3 ONDAS ACÚSTICAS

Este capítulo abrange a propagação de ondas acústicas em líquidos e em sólidos, incluindo materiais piezelétricos. Uma formulação sobre as ondas elásticas é desenvolvida para apresentar os modelos de propagação de ondas nos materiais nomeados anteriormente. Os modelos serviram de base para analisar o comportamento das células geradoras de ondas estacionárias de ultrassom que serão projetadas e, posteriormente, implementadas. As formas de como as ondas se propagam nos diferentes meios serão expostas.

3.1 TEORIA DE ONDAS ACÚSTICAS

Quando as moléculas de um fluido ou sólido são deslocadas de suas configurações características, uma força de restauração elástica interna surge. A força de recuperação elástica juntamente com a inércia do sistema, permite que a matéria sofra vibrações oscilatórias e, assim, gere e transmita ondas acústicas.

As vibrações ultrassônicas (acima de 20.000 Hz) viajam em forma de onda, de modo semelhante à propagação da luz. Ao contrário das últimas, que podem viajar no vácuo, o ultrassom exige um meio elástico, por exemplo, um fluido ou um sólido. É necessário então, definir os dois tipos básicos de ondas que são importantes na propagação de ondas acústicas. O primeiro é a onda longitudinal, onde o movimento de uma partícula no meio acústico acontece na mesma direção de propagação da onda.

Assim, quando uma força é aplicada no meio acústico, ele se expande ou contrai na direção de propagação, como é mostrado na parte superior da Figura 3.1. O segundo tipo é a onda de cisalhamento, na qual o movimento de uma partícula no meio é transversal à direção de propagação, como é ilustrado na parte inferior da Figura 3.1. Ondas de cisalhamento são associadas com a flexão ou torção de um material, e não há nenhuma alteração no volume ou na densidade do material.

Figura 3.1 - Movimento de partícula e direção de propagação da onda.

Fonte: Modificada de OLYMPUS, 2011.

A distância entre as compressões e as rarefações no meio de propagação é conhecida como comprimento de onda λ (ver figura 3.1), e é diretamente proporcional à velocidade de propagação da onda e inversamente proporcional à sua frequência da seguinte maneira:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

3.1.1 Propagação de ondas em materiais sólidos

Figura 3.2 - Tensão mecânica em um sólido unidimensional.

Fonte: KINO, 2000.

Nesta seção, vamos apresentar um conjunto de equações que descrevem a propagação da tensão mecânica em um material sólido unidimensional (Figura 3.2). As quatro variáveis usadas para caracterizar as propriedades mecânicas são: tensão (T), deformação mecânica (S), deslocamento (u) e velocidade da partícula (v).

Segundo a lei de Newton, considerando o elemento unidimensional da Figura 3.2 de seção transversal $dA = dydz$, massa $m = \rho A dx$ e aceleração $\partial^2 u / \partial t^2$. Se as tensões em ambos os extremos não são iguais, há uma força resultante sobre o elemento que é descrita pela seguinte equação (ROSENBAUM, 1988):

$$\frac{\partial T}{\partial x} dx A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \text{ou} \quad \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.2)$$

Essa Equação descreve uma onda acústica que se propaga em um meio sólido anisotrópico, onde ρ é a densidade do meio e t é o tempo.

Figura 3.3 – Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal.

A lei de Hooke afirma que para umas tensões pequenas aplicadas a um sistema unidimensional, a tensão é proporcional à deformação (CHUNG, 1996), pode ser reescrita de forma generalizada conforme a Equação (3.3).

$$T = cS \quad (3.3)$$

Em que S é a deformação definida por $\delta u/\delta x$ e c é a constante elástica do material. Os parâmetros T e c são tensores em um sistema geral (Figura 3.3), mas podem ser representados também por um componente da propagação unidimensional de ondas longitudinais ou de cisalhamento.

Na figura 3.3, os elementos T_{11} , T_{22} e T_{33} representam as componentes normais da tensão e os outros termos, as tensões de cisalhamento. Como o elemento de volume representado anteriormente está em equilíbrio estático, a soma dos momentos que agem sobre o corpo deve ser igual a zero (BREBBIA et al., 1992), em outras palavras para as tensões de cisalhamento cumpre-se que $T_{ij} = T_{ji}$. E da mesma forma, o tensor de deformação S e o tensor de rigidez elástico c também podem ser considerados simétricos. A Equação (3.4) representa o comportamento de onda acústica em um meio sólido:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

A seguinte é a solução para ondas planas se propagando em um meio elástico infinito para a equação anterior (WOOH et al., 1991):

$$u = U e^{jk(nx-ct)} \quad (3.5)$$

Em que n é um vetor unitário com o mesmo sentido da propagação da onda plana, U é a amplitude de deslocamento da onda, k é o número de onda e c é a velocidade de propagação da mesma.

3.1.2 Propagação de ondas em meios fluidos

Para analisar uma onda em um fluido é necessário considerar um pequeno elemento na forma de paralelepípedo de volume $dV = dx dy dz$ fixo no espaço (Figura 3.4), através do qual viaja um elemento fluido. Agora para relacionar o movimento do fluido com a compressão ou expansão do mesmo, é usada a equação da continuidade no elemento que permite fazer a relação entre a velocidade da partícula na direção x e a densidade instantânea do fluido, e estabelecendo que o

princípio de conservação de massa no elemento é cumprido. Se atuar uma força sobre o elemento analisado, ela faz com que o elemento sofra uma aceleração. Da segunda lei de Newton, pode-se obter a equação linear de Euler, a qual é válida para processos acústicos de pequenas amplitudes.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p \quad (3.6)$$

Em que p representa a pressão do fluido, $\vec{v}$ velocidade de partícula e ρ_0 a densidade de película (KINSLER et al., 2000).

Figura 3.4 – Fluxo líquido de massa na direção x para um volume espacialmente fixo.

Fonte: KINSLER et al., 2000.

A Equação (3.7) de propagação da onda acústica em fluidos, em que c_F é a velocidade de propagação e $\mathbf{B}$ é o módulo de elasticidade volumétrica, é dada por:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_F^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

$$c_F = \sqrt{\frac{\mathbf{B}}{\rho_0}} \quad (3.8)$$

A solução da Equação (3.7) para uma onda plana se propagando na direção x é a seguinte:

$$p = \mathbb{P}e^{j(\omega t - kx)} \quad (3.9)$$

com

$$k = \frac{\omega}{c_F} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.10)$$

Em que $\mathbb{P}$ é a amplitude da onda, ω é a frequência angular e k é o número de onda na direção de propagação. A Equação (3.10) estabelece a relação que existe entre o número de onda e a frequência angular.

Se o fluido é isotrópico e homogêneo, a velocidade de propagação é uma constante ao longo do caminho percorrido. Nesse caso, uma onda plana se caracteriza porque cada variável acústica tem amplitude e fase constantes em qualquer plano perpendicular à direção de propagação. Portanto, se uma onda plana está se propagando em uma direção qualquer, pode ser entendida como várias frentes de onda com número de onda $\vec{k} = k\hat{n}$ e com direção de propagação no sentido do vetor unitário $\hat{n}$ (KINSLER et al., 2000). Dessa forma, podem-se expressar a pressão acústica e a velocidade de partícula como uma função do potencial escalar:

$$p = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$v = \nabla \Phi \quad (3.12)$$

Em que Φ é o potencial de velocidade (WEIGHT, 1984). Assim, pode-se usar a equação de Helmholtz para rescrever a Equação (3.6):

$$\nabla^2 \Phi + k^2 \Phi = 0 \quad (3.13)$$

As dissipações na propagação de uma onda acústica estão associadas ao meio e ao contorno do meio de forma geral, porém, em uma análise simplificada, a energia acústica dissipada pode-se considerar como convertida em energia térmica (KINSLER, 2000). Essa dissipação ocorre devido a vários mecanismos de atenuação, mas, principalmente por espalhamento ou absorção. Quando existe dissipação, pode-se considerar somente o coeficiente de absorção α para

representar as perdas. Dessa forma, um número de onda se transforma em complexo da seguinte forma:

$$\mathbf{k} = k - j\alpha \quad (3.14)$$

Substituindo o número de onda da Equação (3.13) pela forma complexa, a solução dessa equação para uma onda plana propagando-se na direção x é a seguinte:

$$p = \mathbb{P}e^{-\alpha x}e^{j(\omega t - kx)} \quad (3.15)$$

Comparando esta solução com a Equação (3.11), é possível identificar que a amplitude da onda acústica plana é diminuída segundo o fator $e^{-\alpha x}$, indicando que a propagação é atenuada (KINSLER, 2000).

3.1.2.1 Intensidade acústica em meios fluidos

Para uma onda harmônica plana viajando na direção z , com $p = \rho_0 c_F v$, a intensidade acústica média representa a taxa por unidade de área do trabalho feito por um elemento fluido em outro elemento adjacente, e é escrita em acústica da seguinte forma (KINSLER et al., 2000):

$$\langle I_a \rangle = \frac{P^2}{2\rho_0 c_F} = \frac{P^2}{2r} \quad (3.16)$$

Em que P é a amplitude de pressão acústica. Analogamente como na eletricidade, em acústica existe uma propriedade chamada impedância acústica específica z , a qual é definida como a razão entre a pressão acústica e a velocidade de partícula. Para ondas planas essa propriedade é chamada de impedância acústica característica r , e é própria de cada material, ela é dada pela densidade característica do fluido e pela velocidade da partícula nele.

$$z = \frac{P}{v} \quad (3.17)$$

$$\tau = \zeta = \rho_0 c_F \quad (3.18)$$

3.1.3 Propagação de ondas em materiais piezelétricos

O efeito piezelétrico é um fenômeno que pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia elétrica ou o contrário. As expressões para um material piezelétrico que representam esse efeito são chamadas equações constitutivas, e relacionam a tensão mecânica T e o deslocamento elétrico D com a deformação mecânica S e o campo elétrico E (ROSENBAUM, 1988).

$$T = c^E S - e E \quad (3.19)$$

$$D = e S + \varepsilon^S E \quad (3.20)$$

Nas equações anteriores c^E é o tensor de rigidez obtido sob um campo elétrico constante, e é o tensor piezelétrico e ε^S é o tensor de permissividade elétrica obtido sob uma deformação constante do elemento. Ambas as equações foram apresentadas em Ieee (1996) para um material piezelétrico linear contínuo de forma simplificada considerando dependência espacial apenas na direção z , considerando o campo elétrico como sendo igual a menos o gradiente do potencial elétrico ($E = -\nabla\varphi$).

$$c^E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + e \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

$$e \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \varepsilon^S \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.22)$$

No seu trabalho Nowotny et al. (1987), apresentam a solução das equações anteriores como um conjunto de equações lineares e os valores das constantes de integração:

$$D = D(0) \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}
T = & \left(\sum_n \beta_j^{(n)} \beta_j^{(n)} \cos(\eta^{(n)} \omega z) \right) T(0) \\
& + \left(- \sum_n \beta_j^{(n)} \beta_k^{(n)} \frac{\rho \omega}{\eta^{(n)}} \sin(\eta^{(n)} \omega z) \right) u(0) \\
& + \frac{e}{\varepsilon^S} \left(\sum_n \beta_j^{(n)} \beta_k^{(n)} \cos(\eta^{(n)} \omega z) - 1 \right) D(0)
\end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned}
u = & \left(\sum_n \beta_k^{(n)} \beta_j^{(n)} \frac{\eta^{(n)}}{\rho \omega} \sin(\eta^{(n)} \omega z) \right) T(0) \\
& + \left(\sum_n \beta_k^{(n)} \beta_k^{(n)} \cos(\eta^{(n)} \omega z) \right) u(0) \\
& + \left(\frac{e}{\varepsilon^S} \sum_n \beta_k^{(n)} \beta_j^{(n)} \frac{\eta^{(n)}}{\rho \omega} \sin(\eta^{(n)} \omega z) \right) D(0)
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
\varphi = & \frac{e}{\varepsilon^S} \left(\sum_n \beta_k^{(n)} \beta_j^{(n)} \frac{\eta^{(n)}}{\rho \omega} \sin(\eta^{(n)} \omega z) \right) T(0) \\
& + \frac{e}{\varepsilon^S} \left(\sum_n \beta_k^{(n)} \beta_k^{(n)} \cos(\eta^{(n)} \omega z) - 1 \right) u(0) \\
& + \left(\frac{e^2}{(\varepsilon^S)^2} \sum_n \beta_k^{(n)} \beta_j^{(n)} \frac{\eta^{(n)}}{\rho \omega} \sin(\eta^{(n)} \omega z) - \frac{z}{\varepsilon^S} \right) D(0) + \varphi(0)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

A constante $\eta^{(n)}$ denominada como *lentidão* é o inverso da velocidade, e é independente da frequência da onda:

$$\eta^{(n)} = \sqrt{\frac{\rho}{c^{D(n)}}} \tag{3.27}$$

Tiersten (1963) define o tensor de rigidez elástica piezelétrica como:

$$c^D = c^E + \frac{e^2}{\varepsilon^S} \tag{3.28}$$

$c^{D(n)}$ representa um conjunto de autovalores e $\beta_k^{(n)}$ os correspondentes autovetores. As seguintes expressões foram determinadas para as constantes de integração.

$$A^{(n)} = \beta_k^{(n)} u_k(0) \quad (3.29)$$

$$B^{(n)} = \frac{\eta^{(n)}}{\rho\omega} \beta_j^{(n)} \left(T(0) + \frac{e}{\varepsilon s} D(0) \right) \quad (3.30)$$

$$\phi_0 = \varphi(0) - \frac{e}{\varepsilon s} u(0) \quad (3.31)$$

$$\phi_1 = -\frac{1}{\varepsilon s} D(0) \quad (3.32)$$

As equações 3.23 até a 3.32 serão usadas na implementação do modelo unidimensional de propagação da onda segundo o método das matrizes de transferência descrito no capítulo 4.

3.2 FORÇA DE RADIAÇÃO ACÚSTICA

Quando uma partícula é suspensa em um campo de uma onda acústica, o fluido ao redor exerce forças hidrodinâmicas sobre ela (KING, 1934). Em uma aproximação linear, essas forças são proporcionais à velocidade do fluido e, na média, não levam a um deslocamento da partícula. Além disso, nessa aproximação são desconsiderados os efeitos associados à viscosidade e à condutividade térmica do meio. O método permite determinar a magnitude média das forças que atuam sobre a partícula em um campo acústico arbitrário, quando a partícula é muito menor do que o comprimento de onda λ . Gor'kov (1962) apresentou uma expressão para obter a média temporal do potencial de radiação acústica U_a que atua sobre a esfera.

$$U_a = 2\pi R^3 \left(\frac{\langle p^2 \rangle}{3c_F^2 \rho_F} \mathcal{F}_1 - \frac{\rho_F \langle v^2 \rangle}{2} \mathcal{F}_2 \right) \quad (3.33)$$

$$\mathcal{F}_1 = 1 - \left(\frac{c_F^2 \rho_F}{c_s^2 \rho_s} \right) \quad (3.34)$$

$$\mathcal{F}_2 = 2 \frac{\rho_s - \rho_F}{2\rho_s - \rho_F} \quad (3.35)$$

Em que R é o raio da esfera, c_F e ρ_F são a velocidade de propagação de onda e a densidade no fluido respetivamente, c_s e ρ_s são a velocidade de propagação de onda e a densidade na esfera. Os fatores ℓ_1 e ℓ_2 foram estabelecidos experimentalmente. Assumindo o volume da esfera como $V_s = \frac{4}{3}\pi R^3$, e usando a densidade de energia cinética $\mathcal{T} = (\rho_0 \langle v^2 \rangle)/2$ e a energia potencial do fluido $\mathcal{U}_F = \langle p^2 \rangle / (2\rho_0 c_F^2)$, é possível transforma do potencial de radiação acústica U_a da seguinte forma:

$$U_a = V_s \left(\mathcal{U}_F \ell_1 - \frac{3}{2} \mathcal{T} \ell_2 \right) \quad (3.36)$$

A força de radiação acústica F_a pode ser calculada utilizando a seguinte expressão.

$$F_a = -\nabla U_a \quad (3.37)$$

Finalmente, substituindo a Equação do potencial de radiação acústica U_a na equação anterior, obtém-se a expressão para a força de radiação acústica (Equação 3.40).

$$F_a = V_s \left(\frac{3}{2} \nabla \mathcal{T} \ell_2 - \nabla \mathcal{U}_F \ell_1 \right) \quad (3.38)$$

Dentro de um campo acústico definido por um potencial de radiação acústica U_a , as partículas vão ser coletadas em um mínimo de potencial acústico (GOR'KOV, 1962). Por exemplo, ao longo da camada de fluido, existem vários comprimentos de onda λ , além de vários pontos de máxima e mínima pressão, mas só os valores menores nos pontos de mínima pressão fazem que uma partícula fique um pouco mais estável nessa posição (ANDRADE et al, 2010). Em um máximo de pressão a partícula ficaria oscilando devido à intensidade maior da pressão.

Uma maneira para determinar se as partículas serão empurradas para o nó ou anti-nó de pressão de uma onda estacionária é através do fator de contraste $\emptyset$, que é dado por (LAURELL et al., 2007):

$$\phi = \frac{5\rho_P - 2\rho_F}{\rho_P - \rho_F} - \frac{\beta_P}{\beta_F} \quad (3.39)$$

Onde ρ_P é a densidade da partícula, ρ_F é a densidade do meio fluido no qual a partícula está imersa, β_P é a compressibilidade da partícula, e β_F é a compressibilidade do fluido. Se o sinal do fator de contraste for positivo, a força de radiação acústica empurra a partícula para o nó de pressão da onda, que o que acontece com uma gota de água imersa em um campo acústico estacionário em óleo. Enquanto que se o sinal for negativo a partícula é empurrada para o anti-nó de pressão, esse efeito acontece quando temos uma gota de óleo imersa em um campo acústico estacionário em água.

Figura 3.5 – Separação de partículas por força de radiação acústica gerada por uma onda estacionária.

Tipicamente, partículas sólidas em um meio líquido são empurradas para o nó de pressão, enquanto que borbulhas são empurradas para o anti-nó de pressão da onda, como ilustrado na Figura anterior. Nessa figura, as partículas sólidas são representadas por círculos pretos preenchidos, enquanto que as borbulhas são representadas por círculos sem preenchimento.

4 MODELO UNIDIMENSIONAL DE PROPAGAÇÃO

O capítulo resume os conhecimentos gerais sobre o modelo matemático baseado na matriz de transferência utilizado para simular o comportamento de um ressonador piezelétrico multicamada, contendo a matriz piezelétrica, a não-piezelétrica e a dos eletrodos da cerâmica. Se for estabelecida uma única direção de propagação de onda, o que acontece para ondas planas, uma cadeia é produzida, onde cada membro da cadeia corresponde a uma respectiva camada física do ressonador.

Na Figura 4.1 são apresentadas as camadas que conformarão a matriz de transferência: a camada piezelétrica entre dois eletrodos, o acoplamento e elemento refletor, e a camada de líquido com uma onda estacionária representada no interior.

Figura 4.1 – Representação de um ressonador piezelétrico multicamada

Esse modelo numérico modela o comportamento de uma célula de separação acústica e forneceu subsídios ao projeto da célula visando à fabricação e verificação experimental do seu funcionamento na coalescência da emulsão de água em petróleo.

4.1 MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA

A descrição geral da matriz de transferência para estruturas de camadas piezelétricas anisotrópicas unidimensionais com dois eletrodos é estendida para estruturas tipo sanduíche com dois eletrodos sem o uso de analogias eletroacústicas. O método usa a descrição da matriz de transferência de cada

camada e representa a totalidade das pilhas de camadas como o produto das suas matrizes, considerando que as excitações são multimodo. Este método é restrito para dois eletrodos.

4.1.1 Matriz de transferência piezelétrica

Figura 4.2 – Sistema de coordenadas para uma camada de espessura l e as suas condições de borda.

Fonte: NOWOTNY et al., 1991.

Quando se tem uma camada entre $z = 0$ e $z = l$ (Figura 4.2), é possível calcular os valores de contorno do vetor deslocamento u , os componentes de tensão T , o potencial elétrico φ e o componente de deslocamento elétrico D em $z = l$ como funções lineares dos valores limites em $z = 0$.

Considerando soluções de estado estacionário, essas relações lineares entre os valores de contorno em ambos os lados da camada podem ser escritos em uma notação matricial comprimida assim (NOWOTNY et al., 1991):

$$\begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=l} = M_p \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=0} = \begin{bmatrix} M^{uu} & M^{uT} & 0 & M^{uD} \\ M^{Tu} & M^{TT} & 0 & M^{TD} \\ M^{\varphi u} & M^{\varphi T} & 1 & M^{\varphi D} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=0} \quad (4.1)$$

Em que M_p representa a matriz de transferência para a camada analisada. Os termos da matriz de transferência, M^{uu} , M^{uT} , M^{TT} e M^{Tu} , correspondem às partes

puramente mecânicas, os mistos $M^{\varphi T}$, $M^{\varphi u}$, M^{TD} e M^{uD} , correspondem à parte piezelétrica e o termo $M^{\varphi D}$ relaciona parâmetros puramente elétricos.

Se nas expressões gerais de T, D, u e φ , Equações (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26), é substituída a variável z pelo valor da espessura da camada l , além de recalculer os valores das constantes de integração das Equações (3.29), (3.30), (3.31) e (3.32), obtém-se os diferentes elementos da matriz de transferência M_p :

$$M^{uu} = M^{TT} = \cos(\eta\omega l) \quad (4.2)$$

$$M^{uT} = \frac{\eta}{\rho\omega} \sin(\eta\omega l) \quad (4.3)$$

$$M^{Tu} = -\frac{\rho\omega}{\eta} \sin(\eta\omega l) \quad (4.4)$$

$$M^{\varphi u} = M^{TD} = -\sqrt{\frac{l}{\varepsilon^S}} \sqrt{\rho\omega^2 l} \frac{2\hbar}{\eta\omega l} \sin^2\left(\frac{\eta\omega l}{2}\right) \quad (4.5)$$

$$M^{\varphi T} = M^{uD} = \sqrt{\frac{l}{\varepsilon^S}} \frac{1}{\sqrt{\rho\omega^2 l}} \hbar \sin(\eta\omega l) \quad (4.6)$$

$$M^{\varphi D} = -\frac{1}{\varepsilon^S} \left(1 - \hbar^2 \frac{1}{\eta\omega l} \sin(\eta\omega l)\right) \quad (4.7)$$

$$\hbar = \frac{e}{\sqrt{c^D \varepsilon^S}} \quad (4.8)$$

Em que $\hbar$ é definido como fator de acoplamento eletromecânico.

4.1.2 Matriz de transferência dos eletrodos

Apesar dos valores de contorno para ambos os eletrodos parecerem iguais, segundo a Equação (4.1), em ambos os lados o valor de D é diferente. As faces do primeiro podem ser denotadas como $D(1^+)$ e $D(1^-)$, e analogamente $D(2^+)$ e $D(2^-)$ para o segundo (Figura 4.3). Para o número 1 a diferença entre ambas as faces está relacionada com a carga eléctrica por unidade de área da seguinte forma:

$$Q = [D(1^+) - D(1^-)]A \quad (4.9)$$

Figura 4.3 – Possíveis condições de contorno para um sistema de dois eletrodos.

Fonte: NOWOTNY et al., 1987.

Em que A é a área do eletrodo. Lembrando que a corrente elétrica é a variação temporal da carga, isto é:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (4.10)$$

A partir de uma solução harmônica em regime permanente do deslocamento elétrico, $D(t) = De^{-j\omega t}$, a intensidade da corrente I que flui pelo eletrodo 1 é obtida derivando a expressão da Equação (4.9):

$$I_1 = j\omega A[D(1^+) - D(1^-)] \quad (4.11)$$

Como foi dito anteriormente o método está limitado a dois eletrodos, se houvessem muitos eletrodos conectados, seria preciso usar as leis de Kirchhoff para obter uma relação entre as diferentes correntes. Porém, neste caso existem apenas dois e, dessa forma, a corrente $I = I_1 - I_2$ está exclusivamente relacionada com a tensão $V = \varphi_1 - \varphi_2$ entre os dois por:

$$I = VY \quad (4.12)$$

Em que Y denota a admitância elétrica do circuito. Se for estabelecido o potencial do eletrodo 2 como referência, $\varphi_2 = 0$, tem-se que a tensão elétrica entre os eletrodos é $V = \varphi_1$ e, dessa forma, substituindo a Equação (4.11) na (4.12), obtém-se a seguinte expressão:

$$D(1^+) = D(1^-) + \frac{Y}{j\omega A} \varphi_1 \quad (4.13)$$

A expressão 4.13 representa o valor do deslocamento elétrico D no lado superior do eletrodo como uma função linear dos valores do potencial elétrico φ e do deslocamento elétrico D no lado inferior. Portanto, podemos escrever a seguinte expressão analogamente à Equação (4.1) para um eletrodo ideal na posição z :

$$\begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=z^+} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & Y/j\omega A & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=z^-} = M_E \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=z^-} \quad (4.14)$$

Para um eletrodo mais espesso se deve considerar também a sua espessura do mesmo como uma parte mecânica da matriz de transferência da seguinte forma:

$$M_{E_{tot}} = M_E \cdot M_{E_{mec}} = M_{E_{mec}} \cdot M_E \quad (4.15)$$

Em que a parte mecânica da matriz de transferência dos eletrodos é dada por:

$$M_{E_{mec}} = \begin{bmatrix} M_{E_{mec}}^{uu} & M_{E_{mec}}^{uT} & 0 & 0 \\ M_{E_{mec}}^{Tu} & M_{E_{mec}}^{TT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

4.1.3 Matriz de transferência não-piezelétrica

A matriz de transferência em um material não piezelétrico pode ser obtida empregando a mesma relação usada na matriz de materiais piezelétricos, mas neste caso, ela terá somente termos que sejam puramente mecânicos, M^{uu} , M^{uT} , M^{Tu} e M^{TT} , (NOWOTNY et al., 1987). Dessa forma, tem-se a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=l} = \begin{bmatrix} M^{uu} & M^{uT} & 0 & 0 \\ M^{Tu} & M^{TT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=0} = M_G \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=0} \quad (4.17)$$

4.2 MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA MULTICAMADAS

A ligação entre duas películas F_1 e F_2 (Figura 4.4), com parâmetros T, D, u e φ para cada camada, pode ser considerada na descrição da matriz de transferência como a multiplicação de ambas as matrizes (NOWOTNY et al., 1987), ou em forma geral:

$$M_F = M_{F_N} \cdot \dots \cdot M_{F_2} \cdot M_{F_1} \quad (4.18)$$

Figura 4.4 – Descrição de um sistema multicamada sem eletrodos.

Fonte: NOWOTNY et al., 1987.

Usando a forma geral de cada matriz de transferência estabelecida para somente uma camada dada pela Equação (4.1), pode-se chegar à seguinte expressão da matriz de transferência que representa as N camadas conservando o formato geral:

$$M_F = \begin{bmatrix} M_F^{uu} & M_F^{uT} & 0 & 0 \\ M_F^{Tu} & M_F^{TT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & M_F^{\varphi D} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Os termos M_F^{uD} , M_F^{TD} , $M_F^{\varphi u}$ e $M_F^{\varphi T}$ não aparecem, pois se anulam no processo ao serem multiplicados por elementos de valor zero.

4.2.1 Matriz de transferência multicamadas com dois eletrodos

Se houver duas camadas (E) como é apresentado na Figura 4.5, a relação entre os parâmetros de T, D, u e φ da superfície livre 1 e da 2 do arranjo total é dada pela matriz de transferência M_{GEPE} :

$$M_{GEPE} = M_G \cdot M_E \cdot M_P \cdot M_E \quad (4.20)$$

As camadas desde G_1 até G_N representam as camadas fora do eletrodo, e são representadas segundo a Equação (4.18) pela seguinte expressão:

$$M_G = M_{G_N} \cdot \dots \cdot M_{G_2} \cdot M_{G_1} \quad (4.21)$$

Figura 4.5 – Configuração de uma estrutura multicamada com dois eletrodos (E).

Fonte: Modificada de NOWOTNY et al., 1987.

Dessa forma, e segundo a Equação (4.19), a matriz de transferência para estas camadas é representada assim:

$$M_G = \begin{bmatrix} M_G^{uu} & M_G^{uT} & 0 & 0 \\ M_G^{Tu} & M_G^{TT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & M_G^{\varphi D} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Finalmente, a matriz total de transferência M_{GEPE} é dada pela seguinte expressão (NOWOTNY et al., 1987; GRÖSCHL, 1998):

$$M_{GEPE} = \begin{bmatrix} M^{uu} & M^{uT} & M^{u\varphi} & M^{uD} \\ M^{Tu} & M^{TT} & M^{T\varphi} & M^{TD} \\ M^{\varphi u} & M^{\varphi T} & M^{\varphi\varphi} & M^{\varphi D} \\ M^{Du} & M^{DT} & M^{D\varphi} & M^{DD} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

A equação anterior representa a forma mais geral. Como há eletrodos incorporados, Geralmente a M_{GEPE} não tem o formato especial com 0 e 1 nos elementos da terceira coluna e da quarta linha observados na matriz de transferência da Equação (4.1). Pode-se solucionar um sistema como o representado na Equação (4.1), desde que a M_{GEPE} seja usada como a matriz de transferência, em um arranjo com superfícies livres nas condições de contorno. Dessa forma, tem-se que as tensões e deslocamentos elétricos são nulos, $T = 0$ e $D = 0$. E representando as condições restantes de contorno para a superfície 1 e a superfície 2, tem-se a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ 0 \\ \varphi_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{uu} & M^{uT} & M^{u\varphi} & M^{uD} \\ M^{Tu} & M^{TT} & M^{T\varphi} & M^{TD} \\ M^{\varphi u} & M^{\varphi T} & M^{\varphi\varphi} & M^{\varphi D} \\ M^{Du} & M^{DT} & M^{D\varphi} & M^{DD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ 0 \\ \varphi_1 \\ 0 \end{bmatrix} = M_{GEPE} \begin{bmatrix} u_1 \\ 0 \\ \varphi_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Da qual se podem obter para o deslocamento u_1 as equações seguintes:

$$u_1 = -[M^{Tu}]^{-1} \cdot M^{T\varphi} \varphi_1 \quad (4.25)$$

$$0 = -M^{Du} \cdot [M^{Tu}]^{-1} \cdot M^{T\varphi} \varphi_1 + M^{D\varphi} \varphi_1 \quad (4.26)$$

Mas segundo a última equação, a próxima condição deve ser cumprida para que não haja solução trivial, ou seja, $\varphi_1 \neq 0$ (NOWOTNY et al., 1987).

$$M^{D\varphi} = M^{Du} \cdot [M^{Tu}]^{-1} \cdot M^{T\varphi} \quad (4.27)$$

Conhecendo os elementos da matriz de transferência da Equação (4.14), é possível observar que a matriz de transferência total M_{GEPE} da Equação (4.24) ficará em função da frequência angular ω e da admitância Y que também será função de ω , $Y(\omega)$. Para determinar o valor da admitância Y precisam-se somente dos termos $M_{GEPE}^{D\varphi}$, M_{GEPE}^{Du} , $M_{GEPE}^{T\varphi}$ e M_{GP}^{Tu} , que podem ser isolados da Equação (4.20) usando a condição estabelecida na Equação (4.27), ficando da seguinte forma:

$$M_{GEPE}^{D\varphi} = \left(\frac{Y}{j\omega A} \right) \left[2 + \left(\frac{Y}{j\omega A} \right) M_P^{\varphi D} \right] \quad (4.28)$$

$$M_{GEPE}^{Du} = \left(\frac{Y}{j\omega A} \right) M_P^{\varphi u} \quad (4.29)$$

$$M_{GEPE}^{T\varphi} = \left(\frac{Y}{j\omega A} \right) [M_G^{Tu} \cdot M_P^{uD} + M_G^{TT} \cdot M_P^{TD}] \quad (4.30)$$

$$M_{GP}^{Tu} = M_G^{Tu} \cdot M_P^{uu} + M_G^{TT} \cdot M_P^{Tu} \quad (4.31)$$

Vale lembrar que as expressões anteriormente apresentadas são válidas somente para a condição de contorno de superfície livre.

Finalmente, da condição de solução não trivial da Equação (4.27), pode-se obter a expressão para o cálculo da admitância conforme a Equação (4.32).

$$\frac{2j\omega A}{Y} = -M_P^{\varphi D} + M_P^{\varphi u} \cdot [M_G^{Tu} \cdot M_P^{uu} + M_G^{TT} \cdot M_P^{Tu}]^{-1} \cdot (M_G^{Tu} \cdot M_P^{uD} + M_G^{TT} \cdot M_P^{TD}) \quad (4.32)$$

4.2.2 Cálculo dos parâmetros T , D , u e φ em um ressonador multicamadas

Todas as quantidades consideradas até agora tem a função de mostrar a dependência espacial apenas na direção de propagação da onda acústica. Este tratamento pode ser justificado porque os transdutores permitem a excitação elétrica independente no sentido da espessura.

Na figura 4.6 pode-se observar um ressonador típico para a geração de um campo ultrassônico estacionário sobre uma camada de líquido. O sistema ressonador possui o elemento piezelétrico (P) com dois eletrodos (E), posicionados um em cada

face, a camada (A) de acoplamento entre o (P) e a camada (L) que representa o líquido analisado, e finalmente a camada (R) que funciona como elemento refletor.

Figura 4.6 – Ressonador multicamada com um único elemento piezelétrico. (P) elemento piezelétrico, (E) eletrodos, (A) camada de acoplamento, (L) líquido e (R) refletor.

Fonte: Modificada de GRÖSCHL, 1998.

Lembrando que tendo os valores dos parâmetros T, D, u e φ com condições de contorno em $z = 0$ da camada, podem ser calculados a partir da equação (4.23) os correspondentes valores em $z = l$. Dessa forma, o método da matriz de transferência permite o cálculo da dependência espacial dos parâmetros considerados dentro das camadas. O cálculo é realizado em três passos (GRÖSCHL, 1998):

- A admitância elétrica $Y(\omega)$ do sistema multicamada é calculada para uma frequência ω selecionada.
- Com o resultado anterior é calculada a matriz de transferência de eletrodos M_E da Equação (4.14).
- Posteriormente, os parâmetros acústicos T, D, u e φ são calculados nas posições $z = z'$ compreendidas entre $z = z_0$ e $z = z_4$ (ver Figura 4.5), através da avaliação gradual da matriz de transferência M_n para cada espessura de camada em cada ponto $l' = z' - z_{n-1}$. Dessa forma, a equação que representa o sistema ao longo de sua espessura é:

$$\begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=z'} = M_n(z' - z_{n-1}) \begin{bmatrix} u \\ T \\ \varphi \\ D \end{bmatrix}_{z=z_{n-1}} \quad (4.33)$$

Neste caso desconsidera-se a parte mecânica dos eletrodos devido a sua espessura ser muito fina e a inércia delas não afeta relativamente o resultado. Por isso, o restante da matriz de transferência dos eletrodos pode ser combinada na matriz do elemento piezelétrico reduzindo o conjunto à seguinte expressão:

$$M_{EPE} = M_E \cdot M_P \cdot M_E \quad (4.34)$$

As condições consideradas na superfície livre em $z = 0$ são:

- Tensão $T_0 = 0$.
- Deslocamento elétrico $D_0 = 0$.
- Deslocamento u_0 é calculado a partir da Equação (4.25), e
- O potencial elétrico $\varphi_0 = V_{ap}$, em que V_{ap} representa a amplitude de tensão aplicada entre os eletrodos (ver Figura 4.4).

Definidas as condições de contorno, é possível calcular através da Equação (4.33) os parâmetros deslocamento $u(z)$, componentes da tensão $T(z)$, potencial elétrico $\varphi(z)$ e componente de deslocamento elétrico $D(z)$ em função do espaço.

4.2.3 Consideração sobre perdas no modelo multicamadas

É possível perceber que anteriormente não foram contempladas as perdas de energia interna do sistema, significando que uma onda acústica propagaria sem atenuação da amplitude e ressonaria indefinidamente, que não é o que ocorre na prática. O amortecimento elástico geralmente depende da temperatura de maneira complexa, bem como da frequência e do tipo de vibração. No entanto, à temperatura

ambiente as perdas acústicas em muitos materiais podem ser descritas adequadamente por um termo de amortecimento viscoso (AULD et al., 1973).

Em um meio ideal, sem perdas, a Lei de Hooke define que a relação entre a força e o deslocamento em uma mola é dada por (ver Figura 4.7a):

$$F = K_M x \quad (4.35)$$

Inserindo-se um elemento correspondente à viscosidade, adiciona-se amortecimento ao sistema (Figura 4.7b), como pode ser visto na Equação (4.36):

$$F = K_M x + K_A \frac{\partial x}{\partial t} \quad (4.36)$$

Figura 4.7 – Análogos mecânicos de (a) um sistema e (b) um elástico amortecido.

FONTE: AULD et al., 1973

Seguindo essa analogia, a relação ideal da Equação 3.3 é transformada incluindo o amortecimento viscoelástico μ , um termo que contém a derivada temporal da deformação:

$$T = cS + \mu \frac{\partial S}{\partial t} \quad (4.37)$$

Reescrevendo a equação anterior para um campo acústico com dependência temporal harmônica $e^{j\omega t}$, tem-se o seguinte:

$$\tilde{T} = c\tilde{S} + j\omega\mu\tilde{S} = \bar{c}\tilde{S} \quad (4.38)$$

Em que $\bar{c}$ é a constante de rigidez elástica complexa

$$\bar{c} = c + j\omega\mu \quad (4.39)$$

A absorção acústica em um meio pode ser descrita pelo fator de qualidade acústica que relaciona constante de rigidez, frequência e viscosidade:

$$Q = \frac{c}{\omega\mu} \quad (4.40)$$

Substituindo a equação anterior na Equação (4.39), obtém-se:

$$\bar{c} = c \left(1 + j \frac{1}{Q} \right) \quad (4.41)$$

E usando a razão estabelecida na Equação (3.50) da lentidão ou inverso da velocidade e a constante de rigidez elástica, para um valor do fator de qualidade acústica $Q \gg 1$ (GRÖSCHL, 1998), obtemos a seguinte expressão:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{\left(1 + j \frac{1}{2Q} \right)} \quad (4.42)$$

Segundo HOLLAND (1967), o amortecimento também pode gerar perdas no dielétrico as quais podem ser consideradas incluindo uma parte imaginária na constante dielétrica:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon + \frac{\gamma}{j\omega} \quad (4.43)$$

Em que γ é a condutividade elétrica. Para camadas longas de espessura constante, a condutividade elétrica pode ser expressa como $\gamma = \omega\varepsilon \tan(\vartheta)$, sendo ϑ o ângulo de perda dielétrica, que geralmente é fornecido pelos fabricantes de cerâmicas piezelétricas. Portanto, a Equação (4.43) pode ser reescrita assim:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon(1 - j \tan \vartheta) \quad (4.44)$$

Um fator de qualidade efetivo Q_{eff} proporciona um método fácil para levar em consideração perdas adicionais, como por exemplo, a absorção da onda sonora devido a bolhas de gás no líquido, divergência da onda, absorção nas paredes laterais, entre outras. O modelo unidimensional, na descrição de um ressonador multicamadas não ideal, pode levar em consideração todos os efeitos que não contribuem para a geração de uma onda estacionária unidimensional, considerando-os como perdas e sendo descritos de uma forma global, como um fator de qualidade efetivo Q_{eff} para cada camada (GRÖSCHL, 1998).

5 ANÁLISE DE RESSONADORES ACÚSTICOS

O método e o projeto de um protótipo de célula ressonante e de outra de coalescência por ultrassom são apresentados neste capítulo. Além disso, será apresentada uma análise da impedância elétrica de cada uma delas por meio da comparação de resultados simulados e de medições físicas.

5.1 COALESCÊNCIA DE EMULSÕES SEM FLUXO

Quando gotículas de água, muito menores que o comprimento de onda, são colocadas em um campo acústico estacionário em óleo, a força de radiação empurra as gotas de água para o nó de pressão da onda, onde ocorre a sua coalescência (PANGU et al., 2004). Isso faz aumentar o diâmetro médio das gotas, facilitando a separação da água do óleo. De forma geral, quanto maior for o tamanho das gotas, maior é a velocidade de separação (FRISING et al., 2006).

Figura 5.1 – Técnica de aplicação de ultrassom na coalescência de emulsões.

Na figura 5.1 é representado o funcionamento do método de aplicação de onda estacionária de ultrassom no auxílio da coalescência de emulsões de água em petróleo. Em cada estágio, estão representadas as quatro camadas do ressonador, sendo elas: primeira a camada do elemento piezelétrico, segunda a do acoplamento,

terceira a de líquido e quarta a do refletor. Os estágios da quebra da emulsão em uma célula sem fluxo atende a seguinte sequência (a), aplicação de ultrassom na cavidade de líquido para geração de campo acústico estacionário em óleo com gotículas de água, (b), aglomeração das gotículas de água nos nós de pressão da onda, (c), coalescência e sedimentação das gotas de água, e finalmente (d), separação das fases líquidas, água e óleo, devido à densidade (GIRALDO et al., 2014).

5.2 PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO CÉLULA PROTÓTIPO RESSONANTE DE ULTRASSOM

O procedimento para a fabricação de uma célula ressonante de ultrassom compreende vários passos. Primeiro, o projeto preliminar da câmara a ser empregada e o cálculo da resposta em frequência da impedância elétrica e do ângulo de fase usando o modelo unidimensional para o conjunto ressonador (cerâmica, acoplamento, líquido e refletor). Segundo, descrição passo a passo do processo de montagem, escolha dos materiais utilizados e a confecção do dispositivo. Finalmente, a realização de testes utilizando um analisador de impedância elétrica e obtenção de curvas viabilizando a comparação delas com as de simulação.

5.2.1 Simulação e projeto do protótipo

O procedimento a seguir foi usado para melhor compreensão do modelo unidimensional descrito anteriormente e validar o código da simulação desenvolvido no software MATLAB®. Simultaneamente com a simulação do modelo unidimensional, foi elaborado um projeto preliminar de um protótipo circular para visualizar a distribuição de cada um dos elementos que o compõem.

Neste caso o ressonador ultrassônico, com estrutura de alumínio, é constituído por um recipiente, que receberá em seu interior o líquido a ser analisado, e uma tampa que vedará, acoplará a câmara e servirá de suporte para o elemento piezelétrico (Figuras 5.2, 5.3 e Anexo A). Como é necessário garantir que a face inferior da tampa mantenha-se em contato com o fluido, ela possui 4 furos para dar vazão ao

excesso de líquido e um furo com rosca para conexão elétrica do polo negativo. O material epóxi condutivo CW2400 da *All-Pec Industries®* foi usado para colar a cerâmica piezelétrica, PZT-4 com frequência de ressonância nominal de 1 MHz. O eletrodo com polarização positiva da cerâmica piezelétrica ficou em contato com o alumínio, ligado à eletrônica como polo negativo, e o eletrodo negativo da cerâmica ficou livre para receber o sinal de excitação (polo positivo da eletrônica). Essa montagem seria obrigatória se a operação fosse pulsada, mas não é necessária para uma operação continua como a usada nesse trabalho.

Figura 5.2 – Design preliminar do protótipo (Recipiente, tampa e cerâmica piezelétrica).

Figura 5.3 – Protótipo de célula circular para verificação de modelos.

As características dimensionais de cada uma das camadas do protótipo estão resumidas na tabela 5.1. O segundo valor dessa tabela faz referência à camada de material epóxi condutivo usado. A tampa tem a função de camada de acoplamento, e o fundo do recipiente funciona como elemento refletor. As propriedades destes elementos são descritas a seguir (Tabela 5.2).

Tabela 5.1 – Dimensões de cada uma das camadas do protótipo.

Espessura [mm]				
Piezelétrico	Epóxi	Acoplamento	Líquido	Refletor
2,02	0,15	6,03	20,31	6,41

Tabela 5.2 – Propriedades dos materiais da célula (protótipo).

Propriedade	Material		
	Alumínio	Epóxi	Água
Velocidade de propagação [m/s]	6437	4326	1490
Densidade [kg/m ³]	2654	3890	998
Fator de qualidade Q_{eff}	100	10	500
Constante elástica c [GPa]	110	72,8	2,2

Tabela 5.3 – Propriedades do elemento piezelétrico (1 MHz).

Propriedade	Piezelétrico PZT4
Velocidade de propagação [m/s]	4171
Densidade [kg/m ³]	7500
Constante elástica c [N/m ²] (c_{33}^E)	130×10^9
Fator de qualidade Q_{eff}	500
Fator de acoplamento eletromecânico k	0,39
Permissividade elétrica ε [A · s/(V · m)] (ε_{33}^S)	$11,51 \times 10^{-9}$
Perda elétrica $\tan\theta$	0,004
Constante piezelétrica e [N/(V · m)] (e_{33})	13,9

Os valores podem variar até 10% segundo as especificações.

Os valores descritos nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 foram usados para analisar, utilizando o cálculo da impedância elétrica, as características do protótipo. Para tanto, simulações do modelo unidimensional foram implementadas com o auxílio do pacote de software MATLAB®.

Os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 são valores modelados da impedância elétrica, em escala logarítmica, e de sua fase em função da frequência. O primeiro mostra o comportamento somente do elemento piezelétrico, o segundo corresponde ao conjunto que inclui a tampa, a camada de

epóxi e a cerâmica piezelétrica e o terceiro apresenta a resposta do ressonador protótipo completo.

Figura 5.4 – Impedância elétrica simulada do elemento piezelétrico.

Na figura 5.4, a linha contínua representa o valor do módulo da impedância elétrica, em que o vale é chamado de ressonância e o pico é conhecido como antirressonância, sendo que em ambas as frequências o valor da impedância é puramente real (KINSLER et al., 2000). Vale ressaltar que, para o elemento piezelétrico, no valor da frequência de ressonância, 1,05 MHz, a amplitude da velocidade tem o maior valor possível e para o da antirressonância, 1,17 MHz, o menor. Na mesma figura, a linha tracejada representa a fase que, de acordo com o que foi citado anteriormente, tem valor próximo de zero para as frequências de ressonância e antirressonância, porém há uma ligeira discrepância devido às perdas.

Para o conjunto que inclui a tampa, o material epóxi e cerâmica piezelétrica da Figura 5.5, as frequências em que ocorreram a ressonância e a antirressonância foram deslocadas para a esquerda, além do que ambos os pontos ficaram mais próximos um do outro. Neste caso, as duas camadas acrescentadas diminuirão a frequência de oscilação na ressonância e na antirressonância, pois o aumento de massa adiciona inércia ao novo conjunto.

Figura 5.5 – Simulação da impedância elétrica do conjunto tampa, epóxi e cerâmica piezelétrica.

Figura 5.6 – Simulação da impedância elétrica do ressonador protótipo completo.

Quando, junto do elemento refletor, a camada de fluido é adicionada à análise no modelo simulado, devido à espessura dela ser de vários comprimentos de onda (λ), múltiplos vales e picos de menor intensidade aparecem como ressonâncias e antirressonâncias (Figura 5.6). Esses novos eventos nas curvas distam entre si de aproximadamente 39 kHz nas regiões afastadas dos da cerâmica (Figura 5.4). Outro fato a se destacar da Figura 5.6 são as novas passagens pelo zero que a curva de fase possui, indicando que existem vários outros pontos em que o valor de amplitude da velocidade é elevado. Além disso, as magnitudes da fase nos novos pontos de ressonância diminuem.

5.2.2 Comparação entre resultados de simulações e dados experimentais

Uma maneira de comparar os resultados obtidos é traçar em uma mesma figura os valores da impedância medidos fisicamente e os simulados. As curvas do protótipo referentes ao valor absoluto da impedância elétrica e a sua fase foram obtidas, com o auxílio de um analisador de impedância 4294A da *Agilent technologies®*, a partir da aplicação de uma excitação oscilatória em diferentes frequências, com a máxima resolução do equipamento (801 pontos).

Figura 5.7 – Comparação da impedância elétrica do ressonador protótipo.

Figura 5.8 – Comparação fase da impedância elétrica do ressonador protótipo.

Observam-se em ambos os gráficos anteriores que os valores medidos e os simulados estão concordantes até a frequência aproximada de 1,12 MHz. Porém o protótipo fabricado possui outros pontos secundários de ressonância com intensidade elevada no intervalo de 1,175 a 1,3 MHz. Isto se dá devido à ressonância da camada de acoplamento de alumínio nessas frequências e isso foi confirmado modificando-se a espessura da camada de acoplamento. Para um valor de 6,4 mm, o fenômeno descrito acontecia em frequências próximas das ressonâncias principais. Posteriormente, a espessura foi reduzida para 6,03 mm, o que fez que o efeito secundário se deslocasse para a direita e se afastasse da região citada (Figura 5.9), permitindo assim, confirmar a hipótese. Os valores de algumas propriedades foram ajustados até 10% para realizar as simulações.

Figura 5.9 – Impedância elétrica experimental do ressonador protótipo variando a espessura da camada de acoplamento.

5.3 PROTÓTIPO DE CÉLULA DE COALESCÊNCIA

Uma célula acústica foi construída, segundo a metodologia descrita na seção 5.1, para a realização de testes de coalescência em emulsões de água e petróleo. Os materiais empregados na fabricação deste protótipo são os mesmos citados nas Tabelas 5.2 e 5.3. Comparações entre as curvas de impedância e de fase obtidas experimentalmente e mediante simulação foram feitas. Além disso, testes de

eficiência e eficácia de operação da célula, quanto ao fenômeno de coalescência, foram realizados em diferentes frequências de operação.

5.3.1 Fabricação e análise

A Figura 5.10 apresenta uma célula protótipo para fazer testes de coalescência. Embora tenha um formato diferente do primeiro, o dispositivo possui o mesmo princípio de funcionamento. Mas, neste caso, o ressonador é composto por duas placas de alumínio, fixadas com 4 parafusos distribuídos nas extremidades. Para conter o fluido que será analisado, uma peça de acrílico com formato da letra “U” foi adicionada, garantindo assim que as distâncias entre todos os pontos de uma placa a outra fossem iguais a espessura do acrílico, 19,55 mm, e também permitindo que a água coalescida no fundo da célula fosse observada. O selante *sikaflex® 1A plus* da *Sika* foi usado na vedação entre a peça de acrílico e as placas de alumínio.

Na célula foram utilizados três elementos piezelétricos para aumentar a área de atuação da força de radiação acústica sobre o volume de fluido analisado. Eles foram ligados em paralelo de modo a todos compartilharem o mesmo aterramento elétrico em um parafuso na região inferior.

Figura 5.10 – Célula protótipo para coalescência.

Os elementos piezelétricos, apesar de serem de um mesmo modelo e de um mesmo fabricante, possuem uma variabilidade considerável nas suas propriedades. Dessa forma, quando várias cerâmicas são utilizadas em conjunto, é necessário fazer a comparação entre elas a fim de garantir que os elementos instalados possuam características similares quanto à resposta em frequência. Assim, nas Figuras 5.11 e 5.12 são apresentadas as curvas das cerâmicas piezelétricas que foram fixadas na célula protótipo de coalescência.

Figura 5.11 – Módulo da impedância elétrica das três cerâmicas usadas na célula.

Figura 5.12 – Fase da impedância elétrica das três cerâmicas usadas na célula.

Por fim, foram estabelecidas as dimensões de cada uma das camadas da célula, que estão resumidas na seguinte tabela:

Tabela 5.4 – Dimensões das camadas da célula de coalescência protótipo.

Espessura [mm]				
Piezelétrico	Epóxi	Acoplamento	Líquido	Refletor
2	0,15	3.2	19,55	8

A simulação realizada utilizou um valor médio na espessura da camada de água pois a montagem física do sistema de fixação projetado prejudica o paralelismo entre as placas de alumínio se os parafusos estiverem muito apertados. Isso faria com que as placas se flexionassem na metade, causando diferentes espessuras entre as placas ao longo do comprimento.

Da mesma maneira que foi feito para o primeiro protótipo, os valores de módulo e fase da impedância elétrica obtidos com o analisador de impedância e com a simulação são comparados nas Figuras 5.13 e 5.14.

Figura 5.13 – Comparação da impedância elétrica da célula protótipo.

No início dos dois gráficos as curvas tem boa concordância entre si, mas posteriormente os picos de ressonância ocorrem em frequências diferentes. Este efeito pode ser causado pelo problema da falta de paralelismo entre as placas de alumínio, descrito anteriormente. Os valores de algumas propriedades foram ajustados até 10% para realizar as simulações.

Figura 5.14 – Comparação da fase de impedância elétrica da célula protótipo.

5.3.2 Análise da frequência de operação

Para se responder uma questão tão simples e ao mesmo tempo tão ampla como qual seria o melhor ponto de operação da célula, é necessário saber se há um único ponto ótimo de operação, talvez vários, ou se a frequência de excitação não interfere na operação da célula. Para encontrar essa resposta, uma varredura em frequência foi feita variando manualmente o valor da mesma no gerador de função, em uma faixa onde estivessem contidas as frequências de ressonância e antirressonância da célula. A partir dessa varredura foram selecionadas várias frequências a serem testadas. Foram selecionados valores de fase zero e também de mínima impedância elétrica.

Figura 5.15 – (Esquerda) Planos da onda estacionária. (Direita) Partículas de amido sedimentadas.

Os valores selecionados encontram-se especificados na primeira coluna da Tabela 5.5, os quais foram obtidos da média em cada condição. No teste de eficiência foram utilizadas emulsões de água com 3% de amido de milho (maisena), pois possibilita observar os planos criados pela onda estacionária no interior da célula, além de sedimentar com relativa facilidade (Figura 5.15).

Tabela 5.5 – Valores médios obtidos na célula de coalescência protótipo em diferentes frequências de operação usando emulsão de água e amido.

Frequência [Hz]	Fase [°]	Corrente [mA]	Tensão [V]	Potência [W]	Desvio padrão pot	Tempo [min.]
970.600	-28	21,72	4,43	4,2	0,34	03:43
979.000	-3	30,23	1,96	3,0	0,31	09:30
1.001.100	22	25,56	7,33	8,4	0,97	01:51
1.032.500	25	24,08	7,64	8,2	0,94	01:50
1.067.700	42	18,15	10,12	6,8	0,36	02:56
1.129.100	2	14,55	19,38	14,1	0,27	01:33
1.146.000	3	15,31	18,58	14,3	1,30	01:16
1.174.500	-13	22,51	17,90	19,6	2,64	01:30

Para excitar o conjunto de elementos piezelétricos da célula e obter os valores de fase, corrente, tensão e potência em cada uma das frequências, foi usada a montagem experimental descrita a seguir e mostrada na Figura 5.16. Um gerador de função (A), modelo 33220A (*Agilent technologies*®), transmite um sinal senoidal de 100mV para um amplificador de potência (B) configurado com um ganho de 25, modelo 800A3A (*AR RF/Microwave Instrumentation*®), cuja saída é ligada diretamente no transdutor de ultrassom da célula (C). A corrente e a tensão aplicadas à célula são medidas com um sensor de corrente elétrica ligado a um amplificador (D), modelo AM503 (*Tektronix*®), e outro de tensão, a um osciloscópio (E), modelo DSO6052A (*Agilent Technologies*®). Por meio dos sinais representados no osciloscópio, é possível determinar a defasagem entre elas. A potência é o resultado da multiplicação dos valores da tensão pela corrente e pelo cosseno da fase. A última coluna da Tabela 5.4 faz referência ao tempo de sedimentação do amido de milho e de formação da camada visível no fundo da célula.

Figura 5.16 – Montagem experimental usada. (A) Gerador de função, (B) amplificador de potência, (C) célula de ultrassom, (D) medidor de corrente e (E) osciloscópio.

As melhores frequências de operação foram os três valores mais altos dos apresentados na Tabela 5.5, sendo que entre eles o de 1.146.000 Hz foi o de maior eficiência, que sobressai pela elevada potência média transmitida ao meio, com um valor de fase muito próximo de zero. Isso é possível de ser observado nas Figuras 5.17 e 5.18, em que a variação da potência e a tensão nos diferentes pontos analisados são apresentadas de maneira esquemática. Adverte-se que o eixo de frequências não está representado de forma contínua. Curioso caso aconteceu com a segunda frequência analisada em que, apesar do valor de fase estar muito próximo de zero, a potência transmitida foi baixa em decorrência da pequena tensão resultante.

Figura 5.17 – Variação da potência nas frequências sob análise.

Figura 5.18 – Variação da tensão nas frequências sob análise.

5.4 PREPARAÇÃO DA EMULSÃO DE PETRÓLEO

Para a avaliação da separação da água do petróleo é necessário definir uma emulsão com características similares às que ele possui quando extraído de um reservatório natural. Assim, uma emulsão com proporção de uma parte de água para duas de óleo do volume total foi considerada como possível e representativa (33,3% de água em volume). Os componentes da emulsão são:

- 200 mL de petróleo cru.
- 100 mL de uma solução aquosa de cloreto de sódio na concentração de 50 g/L.
- 100 μ L de uma solução com teor de 6% do desemulsificante, *dissolvan 961*, dissolvido em álcool isopropílico.

O último valor foi calculado para se obter 20 ppm de desemulsificante na emulsão final, com o objetivo de padronizá-la. A mistura dos componentes foi feita da seguinte forma:

1. Adicionar a solução salina e o petróleo cru dentro de um frasco de vidro com tampa e agitar manualmente com movimentos pendulares para incorporar ambos os líquidos durante 1 minuto (Figura 5.19b e 5.19c).
2. Transferir a emulsão parcial a um becker de vidro. Tempo deste processo deve ser de no máximo 45 segundos (Figura 5.19d).

3. Cisalhar as gotas de água da emulsão para uniformizar a distribuição de tamanho, em um aparelho homogenizador de emulsão, *UltraTurrax®*, a 2000 rpm durante 1 minuto e 15 segundos (Figura 5.19d).
4. Transferir a emulsão resultante para o frasco de vidro novamente e adicionar a solução do desemulsificante preparada. Tempo deste processo deve ser de no máximo 1 minuto (Figura 5.19e).
5. Agitar manualmente o frasco de vidro com movimentos pendulares para incorporar o desemulsificante na emulsão durante 1 minuto (Figura 5.19f).
6. Transferir a emulsão final para a célula ressonante de ultrassom e para o recipiente do teste de controle. Tempo deste processo deve ser de no máximo 1 minuto.

O tempo aproximado do processo, desde que se inicia a preparação da emulsão até depositá-la nos recipientes onde serão feitos os testes, é de 6 minutos.

Figura 5.19 – Preparo da emulsão sintética de água em óleo.

5.5 ANÁLISE E ENSAIOS DE COALESCÊNCIA DE EMULSÕES SEM FLUXO

Os testes de quebra da emulsão de água e petróleo foram feitos por meio da montagem experimental descrita anteriormente na seção 5.3.2. Uma onda senoidal de 100 mV foi amplificada de maneira contínua sobre a célula de coalescência, com

um ganho de 25 a fim de se transmitir uma potência média de 18,8 W, durante 2 minutos. Este período foi escolhido, pois é o tempo médio em que a emulsão permanece dentro do separador eletrostático na linha de processamento de petróleo. Foi usado um controlador PID desenvolvido em MATLAB por Silva (2013), que recebe os valores das grandezas medidas pelos sensores (corrente elétrica, tensão e defasagem entre elas) e envia os comandos de ajuste para o gerador de função via Ethernet.

Realizaram-se quatro testes para analisar a separação com uma potência aproximada de 19 W. Durante os testes foram medidas a potência transmitida, a taxa de coalescência e a temperatura enquanto a fase era mantida o mais próximo possível de zero. A Figura 5.20 apresenta a evolução da sedimentação da água, devido à coalescência, no fundo da célula de ultrassom e no recipiente de controle ao longo do tempo. Esta verificação é realizada visualmente, comparando-se o nível da interface entre água e óleo perante uma escala volumétrica fixa (Figura 5.20).

Figura 5.20 – Variação da coalescência da água ao longo do tempo. Célula ressonante à esquerda e o recipiente de controle à direita.

Figura 5.21– Variação da coalescência na célula de ultrassom.

A Figura 5.21 apresenta a célula em que o teste foi realizado com aplicação de ultrassom, sendo que após 2,5 minutos do início do teste já se podia observar o decaimento da água e aos 7 minutos o processo de coalescência deixou de ser apreciável, atingindo 30% do volume, e a inclinação da curva de separação foi de 5,4 %Volume/minuto. Na Figura 5.22 tem-se o recipiente de controle, isto é, sem a aplicação de ultrassom. Neste último, o decaimento tornou-se visível após 3,5 minutos e o foi dado como finalizado aos 12,5 minutos, chegando a 28%. A inclinação da curva de separação foi de 4,3 %Volume/minuto. Dessa forma, além de apresentar uma taxa de separação maior, a separação com ultrassom também apresentou uma porcentagem um pouco maior de água coalescida no final do teste cujo esperado era de aproximadamente 33%.

Figura 5.22– Variação da coalescência no recipiente de controle.

Nas Figuras 5.23 e 5.24 observa-se a variação da potência transmitida e da fase da impedância elétrica durante os dois minutos em que a onda estacionária de ultrassom foi gerada no interior da célula. É importante ressaltar que, como as características e a temperatura da emulsão mudam ao longo do processo, a potência transmitida se altera devido à variação do valor da impedância elétrica com tendência a diminuir.

Figura 5.23– Potência transmitida à célula durante a aplicação de ultrassom.

Figura 5.24– Variação da fase da impedância durante a aplicação de ultrassom na célula.

O aquecimento citado anteriormente acontece devido às perdas de energia no meio. Durante os 2 minutos em que a célula foi submetida à excitação, a emulsão teve a sua temperatura aumentada em 2 °C, conforme a Figura 5.25.

Figura 5.25– Variação da temperatura durante o teste.

6 CÉLULA DE COALESCÊNCIA EM FLUXO

Uma célula ultrassônica de separação foi construída, segundo a metodologia descrita na seção 5.1, para a realização de testes de coalescência com fluxo em emulsões de água e petróleo. Os materiais empregados na fabricação da célula estão listados nas Tabelas 5.2 e 5.3. Testes de operação da célula para avaliação da eficiência na coalescência de emulsões de água em óleo foram realizados utilizando um sistema de controle de frequência e potência (Ver Anexo C).

6.1 COALESCÊNCIA DE EMULSÕES COM FLUXO

Como dito anteriormente, se gotículas de água, bem menores que o comprimento de onda, são submetidas a um campo acústico estacionário em óleo, a força de radiação as empurra para os nós de pressão da onda, causando a coalescência das gotas de água (PANGU et al., 2004).

Figura 6.1– Técnica de aplicação de ultrassom na coalescência de emulsões em um sistema com fluxo.

Na Figura 6.1 é analisado o funcionamento do método de aplicação de uma onda estacionária de ultrassom na coalescência de emulsões de água em petróleo em um

sistema com fluxo. Nesta Figura estão representados os transdutores 1 e 2 junto a um esquema de onda estacionária gerada por cada elemento. A direção do fluxo da emulsão e o principal gradiente de temperatura também estão representados. Na parte superior da figura verifica-se a entrada de fluído e, posteriormente, a geração de um campo acústico estacionário em óleo com gotículas de água pela aplicação do ultrassom. Em seguida, as gotículas de água se aglomeram nos nós de pressão da onda, coalescem e sedimentam. A separação completa das fases líquidas de água e óleo acontece no vaso separador da planta piloto. O vaso separador possui o visor da interfase água-óleo (Ver Fig. 6.13).

6.2 CÉLULA DE COALESCÊNCIA EM FLUXO

6.2.1 Fabricação da célula de coalescência em fluxo

O projeto da célula de coalescência é o ponto chave no desenvolvimento de um sistema de desemulsificação. Ela consiste, basicamente, de uma cavidade que é ressonante devido a transdutores piezelétricos. A frequência de ressonância da cavidade depende da velocidade de propagação do som na camada de líquido que, por sua vez, depende da temperatura. Se houver um gradiente de temperatura no interior da cavidade, diferentes seções da célula irão apresentar diferentes frequências de ressonância. Nesse caso, a utilização de uma única frequência de operação em toda a cavidade irá produzir a coalescência da emulsão apenas em locais onde ocorra a ressonância, as demais posições da cavidade somente transmitirão energia à emulsão para aumentar sua temperatura, o que diminui a eficiência do processo. Esse tema será abordado posteriormente nesse mesmo item (6.2.1)

Para controlar este fenômeno foram utilizados dois transdutores piezelétricos de ultrassom que se podem excitar independentemente. No entanto, verificou-se que o principal gradiente de temperatura ocorre na direção do fluxo, por esse motivo os elementos piezelétricos foram divididos em dois conjuntos nomeados como transdutor 1 e transdutor 2 (ver Fig. 6.1 e 6.2 esquerda), e foram posicionados transversalmente ao fluxo. Esta abordagem foi empregada de modo a reduzir a influência do gradiente de temperatura entre a entrada e a saída da célula de

coalescência. Cada transdutor é formado por três cerâmicas piezelétricas quadradas (40mm x 40mm) com frequência central ao redor de 1 MHz e foram ligadas eletricamente em paralelo.

Figura 6.2 – Célula de coalescência em fluxo.

Figura 6.3 – Condutância elétrica da célula (Superior) a temperatura ambiente (20,7 °C), e (inferior) com um gradiente de temperatura entre a entrada e a saída (13,3 – 22,4 °C).

Na Figura 6.3 é apresentada a comparação entre a condutância elétrica dos transdutores 1 e 2 da célula e deles operando em paralelo. Na parte superior desta figura à temperatura ambiente de 20,7 °C, e na parte inferior com gradiente de temperatura entre a entrada e a saída da célula de 13,3 a 22,4°C. No gráfico superior os picos de ressonância dos transdutores operando separadamente e em conjunto estão em regiões relativamente próximas e são bem definidos, mas, no gráfico inferior, quando a célula é submetida a um gradiente de temperatura, os picos de ressonância ficam deslocados entre 2 e 9 kHz. Além disso, a amplitude da condutância diminuiu, observando, por exemplo, o último grupo de picos, com os transdutores operando em paralelo o valor da condutância seria de 85,8 mS, e por separado seria de 103,9 mS, a soma. Operar em paralelo como se a célula possuísse um único transdutor diminuiria a eficiência de operação. Além disso, apareceram outros *picos* que entorpeceriam a operação do sistema de controle de frequência, que será apresentado posteriormente.

Continuando com a descrição da fabricação da célula, a cavidade ressonante foi construída em uma única peça de alumínio, a qual está fixada a duas seções cônicas de entrada e saída com parafusos. Esta foi ainda, vedada através de um *o-ring* em cada extremidade. Dois sensores *LM35* foram fixados para registrar o valor da temperatura na superfície da entrada e da saída da célula (ver Fig. 6.2 direita).

Figura 6.4 – Impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 1 da célula (CH1).

Nas Figuras 6.4 a 6.7 são apresentadas as curvas do módulo da impedância e da fase das cerâmicas piezelétricas que foram empregadas em cada um dos grupos na célula de coalescência em fluxo.

Figura 6.5 – Fase da impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 1 da célula (CH1).

Figura 6.6 – Impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 2 da célula (CH2).

As dimensões de cada uma das camadas da célula são apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 6.1 – Dimensões das camadas da célula de coalescência protótipo.

Espessura [mm]				
Piezelétrico	Epóxi	Acoplamento	Líquido	Refletor
2	0,15	5.6	20	8

Figura 6.7 – Fase da impedância elétrica das três cerâmicas usadas no canal 2 da célula (CH2).

6.2.2 Caracterização da célula de coalescência em fluxo

Figura 6.8 – Condutância elétrica do transdutor 1 da célula em fluxo.

A Figura 6.8 apresenta as curvas de condutância elétrica da célula com a cavidade com óleo, representada pela linha contínua, e sem líquido, representada pela linha

tracejada. Na primeira curva, é numerada de 1 a 4 uma sequência de picos causados pelas ressonâncias no interior da câmara devido à presença do petróleo na cavidade. A célula deve operar em um dos picos numerados, os quais representam as ressonâncias da cavidade, para ter maior eficiência na coalescência de água.

Para conhecer o comportamento térmico dos picos de ressonância com a variação lenta da temperatura, foram selecionados quatro picos (Ver Fig. 6.8) para realização de um teste de aquecimento e posterior resfriamento gradual utilizando-se um calefator externo. A figura 6.9 mostra a evolução temporal da temperatura no teste.

Figura 6.9 – Variação de temperatura durante o teste de resfriamento.

Figura 6.10 – Variação da frequência dos picos de ressonância em função da temperatura.

Com a realização desse teste foi possível elaborar dois gráficos. O primeiro, Figura 6.10, representa a variação da frequência de ressonância de cada um dos quatro picos analisados. Nesse gráfico pode-se observar que todas as curvas geradas pelas ressonâncias são paralelas entre si, e além de terem a mesma inclinação, ou dependência com a temperatura, a distância entre elas é um valor constante, Δf . O valor do modo de ressonância fundamental é aproximadamente 34,5 kHz.

Figura 6.11 – Variação da amplitude da condutância dos picos de ressonância em função da temperatura.

A tendência mais comportada apresentada na Figura 6.10 não é apreciada no gráfico anterior. A Figura 6.11 apresenta as curvas da variação da amplitude da condutância elétrica, é possível observar como a condutância cambia com a mudança de temperatura e não tem um padrão de variação observável com a exceção das contínuas oscilações ao longo da curva.

6.3 CONTROLE DE SEGUIMENTO DE FREQUÊNCIA

Devido à variação de temperatura durante a operação da célula de separação, foi necessário um sistema de seguimento e sintonização de frequência para manter uma onda estacionária no interior da câmara.

A máxima transferência de energia do transdutor para o meio ocorre quando o transdutor está em máxima admitância (MORTIMER et al., 2001), quando a

admitância é puramente resistiva (RAMOS-FERNANDEZ et al., 1985). Sendo a condutância a parte real da admitância, ela também terá um pico de valor máximo. Desse modo, se pode considerar a condutância como proporcional à energia consumida pela câmara de separação ou à potência fornecida pelo sistema elétrico.

A Figura 6.8 apresenta duas curvas de condutância elétrica, uma com a cavidade da célula com óleo e a outra com ar. No caso da câmara com óleo, observou-se uma sequência de pequenos picos que são devidos às ressonâncias no interior da câmara. Sintonizar a frequência de excitação em um desses picos de ressonância e fazer o seguimento deles na frequência, deslocamento devido às mudanças de temperatura (Ver Fig. 6.10), são os principais objetivos do sistema de controle. O controlador ajusta a frequência da tensão de excitação dos transdutores 1 e 2, de maneira independente, para seguir um pico de ressonância da câmara em um dado intervalo de frequência (1,09-1,15 MHz), evitando a ressonância dos transdutores onde as correntes de excitação são elevadas (GIRALDO et al., 2015). Como foi observado na Figura 6.11, o sistema de controle também deve controlar a intensidade da potência fornecida aos transdutores, para que seja um valor constante e, que nesse caso, foi feito mediante um controle de regulação automática da tensão de excitação. Refira-se ao anexo C para maior informação sobre o controle de frequência.

6.4 PREPARAÇÃO DA EMULSÃO DE PETRÓLEO PARA TESTES COM FLUXO

A seguir, descreve-se a metodologia usada no preparo de emulsões no Centro de Pesquisas da Petrobras, CENPES, no Rio de Janeiro para realização de testes em uma planta piloto de processamento eletrostático. Uma emulsão com proporção de 30% de água para 70% de óleo do volume total é considerada para descrever o processo. Os componentes da emulsão são:

- 2100 mL de petróleo cru.
- 900 mL de água.

O teor de desemulsificante, *dissolvan 961*, varia segundo o teste realizado. A mistura dos componentes foi feita da seguinte forma:

1. Foram adicionados água e o petróleo cru em um frasco de alumínio com tampa e, posteriormente, agitado com movimentos pendulares, 60 batimentos por minuto, para incorporar ambos os líquidos durante 1 minuto (Fig. 6.12a e 6.12b).
2. Transferência da emulsão parcial a um becker (Fig. 6.12c).
3. Cisalhamento das gotas de água da emulsão para uniformizar a distribuição de tamanho, em um aparelho homogeneizador de emulsão a 10000 rpm durante 3 minutos (Fig. 6.12d).
4. Transferência da emulsão resultante para o frasco de alumínio novamente e adição do desemulsificante. (Fig. 6.12d e 6.12f).
5. Agitação manual do frasco de vidro com movimentos pendulares para incorporar o desemulsificante na emulsão durante 20 segundos.

Figura 6.12 – Preparo da emulsão de água em óleo no CENPES.

6.5 AJUSTE DA PLANTA DE PROCESSAMENTO

Antes de iniciar cada teste o circuito hidráulico foi limpo com querosene. Deixando-se circular 10 L de querosene na planta piloto até que o líquido que sai pela descarga estivesse limpo. Posteriormente, houve um estágio de estabilização das condições do sistema. Circulando petróleo na planta, a temperatura foi aumentada gradualmente até atingir 70°C no vaso da interfase água-óleo (Ver Fig. 6.13),

simultaneamente a pressão no sistema foi ajustada em 517 kN/m² (75psi) e a vazão de saída foi escolhida segundo as condições do teste realizado.

Depois de atingir todas as condições de estabilização, retirou-se o petróleo circulante, deixando o tanque de carga no seu mínimo valor, garantindo que houvesse fluido na unidade de processamento. Quando alcançado esse nível, a emulsão preparada foi depositada no tanque de carga. Este por sua vez possui um misturador, que gira a 160rpm, para evitar a coalescência da emulsão antes da entrada na planta.

Figura 6.13 – Planta de processamento de petróleo com a célula de separação instalada.

6.6 RESULTADOS E ANÁLISE DOS TESTES DE COALESCÊNCIA DE EMULSÕES COM FLUXO

A separação acústica de emulsões de água em óleo usando uma célula ressonante de ultrassom foi realizada. Quatro regimes de trabalho foram testados para avaliar a eficiência de separação, com e sem a aplicação de ultrassom na câmara de coalescência. Durante os ensaios, a temperatura e a pressão estática foram mantidas constantes a 70 °C e 517 kPa, respectivamente (Ver seção 6.5). Os testes foram realizados variando a quantidade de desemulsificante, o teor inicial de água na emulsão e a vazão do sistema. Em todos os testes a potência elétrica fornecida para a célula de separação foi mantida constante em 80 W mediante o uso do sistema de controle. As amostras para determinação do conteúdo de água final

foram coletadas na saída 1 (Ver Fig. 6.13) da planta cada 20 minutos, em um período de, aproximadamente, uma hora e meia. Posteriormente, o teor final de água foi determinado usando o método de titulação Karl Fischer. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 6.2. Cada valor de teor final é obtido da média de seis amostragens e para cada amostra foram realizadas duas medições.

Os resultados da Tabela 6.2 mostram que a aplicação de ultrassom, na planta de processamento de petróleo do Laboratório de separação eletrostática no CENPES, aumentou a coalescência de água da emulsão em todas as condições testadas quando é comparada com um teste sem aplicação de ultrassom.

Tabela 6.2 – Comparação da separação de emulsão de água em óleo com e sem a aplicação de ondas estacionárias de ultrassom.

Teste	Teor inicial de água na emulsão [% em massa]	Quantidade de desemulsificante [ppm]*	Vazão do sistema [mL/min]	Teor final de água na emulsão [% em massa]			
				Ultrasound off		Ultrassom on	
				Média	Desv	Média	Desv.
1	30	25	100	4,0	0,7	2,6	0,5
2	30	25	200	15,1	2,9	5,0	1,8
3	30	50	100	2,5	0,4	1,9	0,1
4	50	25	100	2,3	0,3	1,5	0,2

*ppm: Partes por milhão

Nos gráficos apresentados na Figura 6.14 estão registrados os valores do teor final de água na emulsão em função do tempo de duração do teste. Os valores aparecem registrados somente a partir do minuto 100 devido ao tempo de espera de estabilização das condições na planta de processamento de laboratório. Nos 4 testes apresentados, embora exista uma variação entre os valores das amostras tomadas, os teores finais de água obtidos nos testes usando ultrassom foram sempre menores. Somente no teste 3 os valores das terceiras amostras se sobrepõem. Observando os valores do teste 2, no qual foi dobrado o valor da vazão do sistema até 200mL/min, torna-se evidente a melhoria na cinética de separação que a aplicação de ultrassom gera no teste, com uma diminuição de 10 pontos percentuais no teor final de água da emulsão. No resultado do teste 3 se pode observar como o uso de uma maior quantidade de desemulsificante ajudou a

melhorar a separação nos testes com e sem aplicação de ultrassom (Ver também a última coluna da Tabela 6.2). O melhor resultado para o teste de separação com o auxílio do ultrassom, foi obtido no teste com o maior teor inicial de água na emulsão, com uma razão de água e petróleo de um para um. Nesse teste, a média do teor final foi 1,5 %massa com um desvio padrão de 0,2 %massa. Esse valor baixo indica que os valores das amostras tendem a estar próximos da média calculada. Por outro lado, embora o desvio padrão seja o maior entre todos os testes, o melhor resultado, quando comparado com um teste em branco, foi obtido na segunda condição. No caso de aplicação de ultrassom o valor representa uma diminuição de 83% no teor final de água e no teste em branco seria somente de 50%.

Figura 6.14 –Teor final de água na emulsão em função do tempo, com e sem aplicação de ultrassom, condições do teste 1 até 4 listados na Tabela 1.

Na figura 6.15 é comparado o uso de duas diferentes vazões no sistema com aplicação de ultrassom. O primeiro teste com 100mL/min e o segundo com o dobro

dessa quantidade, 200mL/min. A diferença das médias do teor final de água na emulsão dos testes é praticamente o dobro, 2,6 para 5 respectivamente, indicando que o tempo de residência ao interior da célula de separação é um fator importante no processo de coalescência de emulsões de água e óleo.

Figura 6.15 – Influência da vazão no teor final de água na emulsão em função do tempo, testes 1 e 2 da Tabela 1.

Figura 6.16 – Influência da quantidade de desemulsificante no teor final de água na emulsão em função do tempo, testes 1 e 3 da Tabela 1.

Na figura 6.16 são comparadas duas quantidades de desemulsificante no sistema com aplicação de ultrassom, 25 e 50 ppm respectivamente. O uso de uma maior quantidade de desemulsificante químico ajudou a diminuir o teor final de água na

emulsão, embora nesse caso, o teor final de água não tenha diminuído pela metade como no caso da vazão ao dobrar a quantidade do produto, o valor médio obtido foi menor do que no caso anterior. O resultado indica que o aumento na quantidade do químico melhora o processo de coalescência de emulsões, porém, devem-se ressaltar dois pontos importantes: primeiro, o desemulsificante químico é uma substância custosa que não agrega valor ao petróleo, e segundo, após o processamento primário de petróleo realizado em campo, o conteúdo de desemulsificante no óleo antes de entrar na refinaria não deve ser muito elevado, isso implicaria no uso de processos adicionais para eliminar o excesso desse químico.

Na figura 6.17 é apresentada a comparação entre dois conteúdos iniciais de água, 30 e 50%, no teor final de água na emulsão em função do tempo com aplicação de ultrassom. Como foi dito anteriormente, o melhor resultado em um teste com aplicação de ultrassom foi obtido usando o maior teor inicial de água na emulsão, 50%, 25 ppm de desemulsificante químico e uma vazão de 100mL/min.

Figura 6.17 – Influência do teor inicial de água no teor final de água na emulsão em função do tempo, Testes 1 e 4 da Tabela 1.

Esse resultado é muito importante para a caracterização e distinção do método de quebra de emulsões de água em óleo com o uso de uma onda acústica estacionária, devido ao fato de que emulsões de petróleo com um teor de água elevado, maiores a 20%, normalmente não são separadas por eletro-coalescedores com eletrodos de metal descoberto (FRISING et al., 2006), o qual é um dos principais métodos usados

para realizar o processamento primário de petróleo. Esses separadores eletrostáticos podem ser usados em conjunto com outras tecnologias. Nesse caso, como o ultrassom não tem restrição quanto ao teor inicial de água na emulsão, ele poderia ser uma boa alternativa para ser parte de um sistema de processamento primário em conjunto com um separador eletrostático.

Deve-se destacar que os testes realizados e a posterior análise foram realizados graças ao controle de seguimento de frequência desenvolvido.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Um ressonador multicamada constituído por quatro camadas (piezelétrica, acoplamento, líquido e refletora), foi modelado usando o método da matriz de transferência, a qual permite calcular a impedância eléctrica como uma função da frequência. A aplicação prática do modelo requer o conhecimento de todos os parâmetros dos materiais envolvidos, estes são para cada camada: espessura, densidade, constante elástica, fator de qualidade e velocidade de propagação. Além disso, para os elementos piezelétricos são necessárias o conhecimento da: constante piezelétrica, perda eléctrica, permissividade eléctrica e fator de acoplamento eletromecânico.

Uma célula para testes de coalescência em fluxo foi projetada. Ela consiste, basicamente, de uma cavidade ressonante devido a dois transdutores piezelétricos com frequência central ao redor de 1 MHz. A frequência de ressonância da cavidade depende da velocidade de propagação do som na camada de líquido que, por sua vez, depende da temperatura. Com a comprovação da existência de um gradiente de temperatura entre a entrada e a saída da cavidade, foram utilizados dois grupos de transdutores piezelétricos que se podem excitar independentemente, posicionados transversalmente ao fluxo. Esta abordagem foi empregada de modo a reduzir a influência do gradiente de temperatura. Verificou-se que a disposição por separado dos transdutores comparada a uma ligação em paralelo deles, aumenta o valor da soma da condutância eléctrica, e em consequência, a potência fornecida para a célula de coalescência validando a hipótese do uso de dois transdutores assumida no projeto da célula.

Um sistema de controle para o processo de quebra de emulsões de água em óleo foi desenvolvido. Para obter uma melhor eficiência na célula de coalescência, cada transdutor foi excitado de maneira independente usando dois controles autônomos tipo *hill-climbing* implementados. Ajustando a frequência da tensão de excitação dos transdutores 1 e 2, de modo independente, o controlador segue um pico de

ressonância da célula de coalescência no intervalo de frequência de 1,09 a 1,15 MHz, evitando as ressonâncias dos transdutores onde as correntes de excitação são elevadas. Essa parte do sistema de controle assegura o regime de ressonância no interior da cavidade da célula, garantindo máxima transmissão de energia para o fluido. Devido à variação da amplitude da condutância elétrica com a temperatura, o sistema também regula a intensidade da potência fornecida aos transdutores, garantindo um valor constante necessário na realização dos testes, mediante a alteração da amplitude da tensão de excitação dos transdutores. O controle de potência e seguimento de frequência desenvolvido apresentou um bom desempenho, independentemente do efeito da variação da temperatura na célula de coalescência.

A separação acústica de emulsões de água em óleo usando uma célula ressonante de ultrassom foi realizada em uma planta de laboratório de processamento de petróleo. Os testes foram realizados variando a quantidade de desemulsificante, o teor inicial de água na emulsão e a vazão do sistema, conservando a potência elétrica fornecida constante em 80 W mediante o uso do sistema de controle. Os resultados mostraram que a aplicação de ultrassom aumentou a coalescência de água da emulsão em todas as condições testadas quando comparada a um teste sem aplicação de ultrassom, verificado pelo menor teor final de água na emulsão. As gotículas de água foram submetidas a um campo acústico estacionário em óleo, onde a força de radiação as empurrou para os nós de pressão da onda, produzindo a coalescência das gotas de água (PANGU et al., 2004), com isso, aumentando a cinética de separação. O teste de variação das vazões no sistema com aplicação de ultrassom indicou que o tempo de residência ao interior da célula de separação é um fator importante no processo de coalescência de emulsões de água e óleo, ao diminuir a separação de água com o aumento da vazão. O uso de uma maior quantidade de desemulsificante químico melhora o processo de coalescência de emulsões, porém, deve-se ressaltar que esse produto é uma substância custosa que não agrega valor ao petróleo, e que em maior quantidade no óleo implica no uso de processos adicionais para eliminar o excesso antes do repasse final à refinaria. Emulsões de petróleo com um teor de água maiores a 20%, normalmente não são separadas por eletro-coalescedores com eletrodos de metal descoberto (FRISING et al., 2006), o qual é um dos principais métodos usados para realizar o processamento

primário de petróleo. Os testes realizados com teor inicial de água na emulsão de 30 e 50% indicam que o ultrassom não tem restrição quanto a esse parâmetro, e que poderia ser uma boa alternativa para ser parte de um sistema de processamento primário em conjunto com um separador eletrostático.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Uma eletrônica de controle com capacidade de potência da ordem de 140 W foi desenvolvida no Laboratório de Ultrassom da Universidade de São Paulo. Para este equipamento aguarde-se a realização de testes para avaliação de seu funcionamento, bem como a realização de testes de coalescência de emulsões na planta de laboratório do Centro de Pesquisa da Petrobras. As metodologias e especificações descritas no trabalho podem ser empregadas como base para projetar uma célula de coalescência com um maior número de atuadores, transdutores, e ainda, analisar se com uma maior “resolução” das propriedades da emulsão ao interior da cavidade é possível melhorar a eficiência de separação.

Entender a parte microscópica do processo de coalescência de emulsões de água em óleo com o estudo da coalescência em células ultrassônicas através da modelagem e desenvolvimento de dispositivos microfluídicos para manipulação de partículas por ultrassom, usando emulsões de óleo em água com pequenas concentrações de óleo e também com emulsões de água em óleo. Além disso, elaborar um modelo da força de radiação acústica que atua sobre uma gota de água num campo acústico considerando a força de arrasto.

REFERÊNCIAS

- ABID, S.; CHESTERS, A.K. **The drainage and rupture of partially-mobile films between colliding drops at constant approach velocity**, International Journal of Multiphase Flow, v. 20, n. 3, p. 613-629, 1994.
- AULD, B.; AULD, B. **Acoustic fields and waves in solids**. John Wiley & Sons Inc, 1973. V. 1. (Acoustic Fields and Waves in Solids). ISBN 9780471037026
- ANDRADE, M .A. B.; BUIOCHI, F.; ADAMOWSKI, J. C. **Finite element analysis and optimization of a single-axis acoustic levitator**, Ieee Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 57, n. 2, p. 469-479, feb 2010.
- BARMATZ, M.; COLLAS, P. **Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields**. Journal of the Acoustical Society of America, v. 77, n. 3, p. 928–945, 1985.
- BARNES, H. A. **Rheology of emulsions** - a review, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 91, p. 89-95, nov. 1994.
- BAZHLEKOV, I.B.; CHESTERS, A.K.; VAN DE VOSSE, F.N. **The effect of the dispersed to continuous-phase viscosity ratio on film drainage between interacting drops**. International Journal of Multiphase Flow, v. 26, n. 3, p. 445– 466, mar. 2000.
- BECHER, P. **Principles of emulsion technology**, Reinhold Pilot Book - 5, Chapman & Hall, 1955.
- BECHER, P. **Encyclopedia of emulsion technology**, v. 4, New York Marcel Dekker Inc., Nova Iorque, 1996.
- BECHER, P. **Emulsions**: theory and practice, 3^a ed., Washington, D.C., American Chemical Society, New York, Oxford University Press, 2001.
- BECKER, J. R. **Crude oil waxes, emulsions, and asphaltenes**. The Oil and Gas Journal, v.96, n.19, p. 85, mai. 1998.
- BERRYMAN, J.G. **Random close packing of hard spheres and disks**, Physical Review A, v. 27, n. 2, p. 1053-1061, fev. 1983.
- BRADLEY, H.B. **Petroleum engineering handbook**, Society of Petroleum Engineers, 3a ed., EUA, 2005.
- BREBBIA, C. A., Dominguez, J. **Boundary Elements: An Introductory Course**, McGraw-Hill, Southampton - UK, 2^a ed., 313 p., 1992.
- BROOKS, B.W.; RICHMOND, H.N.; ZERFA, M. **Modern aspect of emulsion science**, Bernard P. Binks Editor, The Royal Society of Chemistry, Reino Unido, 1998.

CHUNG, T. J. **Applied continuum mechanics**, Cambridge University Press, New York, EUA, 252 p., 1996.

EOW, J. S.; GHADIRI, M. **Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil** - a review of the technology. Chemical Engineering Journal, v. 85, n. 2-3, p. 357–368, jan. 2002.

FANG, H. et al. **A study of thin liquid films related to the stability of crude oil emulsions**. Journal of Colloid and Interface Science, v. 238, n. 1, p. 177–182, jun. 2001.

FRISING, T.; NOIK, C.; DALMAZZONE, C. **The liquid/liquid sedimentation process: From droplet coalescence to technologically enhanced water/oil emulsion gravity separators: A review**. Journal of Dispersion Science and Technology, Taylor & Francis Inc, v. 27, n. 7, p. 1035–1057, 2006.

FRISING, T. et al. **Contribution of the sedimentation and coalescence mechanisms to the separation of concentrated water-in-oil emulsions**. Journal of Dispersion Science and Technology, v. 29, n. 6, p. 827-834, jul. 2008.

GAIKWAD, S. G.; PANDIT, A.B. **Ultrasound emulsification: Effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size**. Ultrasonics Sonochemistry .v. 15, n. 4, p. 554-563, abr. 2008.

GIRALDO, C. M. et al. **Aplicação de ondas estacionárias de ultrassom para quebra de emulsões de água em óleo**. *In*: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014, Rio de Janeiro - RJ, set. 2014.

GIRALDO, C. M. et al. **Design and implementation of the frequency control in an ultrasonic break water-in-oil emulsion chamber**. *In*: 2015 International Congress on Ultrasonics, Metz, França, mai. 2015.

GORKOV, L. P. **On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid**. Soviet Physics - Doklady, v. 6, n. 9, p. 773–775, mar. 1962.

GRÖSCHL, M. **Ultrasonic separation of suspended particles** - part i fundamentals. Acustica, v. 84, n. 3, p. 432–447, maio 1998.

HAAR, G. **Review, therapeutic applications of ultrasound**. Progress in Biophysics and Molecular Biology. v. 93, n. 1, p. 111-129, 2007.

HOLLAND, R. **Representation of dielectric, elastic, and piezoelectric losses by complex coefficients**. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, v. SU14, p. 18-20, jan. 1967.

IEEE. **Ieee standard on piezoelectricity**. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, The institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 43, n. 5, p. 1–54, set. 1996.

KANG, W; et al. **Influence of demulsifier on interfacial film between oil and water**, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 272, n. 1-2, p. 27-31, fev. 2006.

KIM, Y.H.; WASAN, D.T. **Effect of demulsifier partitioning on the destabilization of water-in-oil emulsions**, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 35, n. 4, p. 1141-1149, abr. 1996.

KING, L. V. **On the acoustic radiation pressure on spheres**. Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, v. 147, n. 861, p. 212–240, 1934.

KINO, G. S. **Acoustic waves**: devices, imaging, and analog signal processing, Prentice-Hall Inc., edição corrigida, 2000, 601 p., ISSN 0-13-003047-3.

KINSLER, L.; et al. **Fundamentals of acoustics**. John Wiley & Sons Inc., EUA, 551 p., 2000. ISBN 0-471-84789-5.

KOKAL, S. **Crude oil emulsion**: a state-of-the-art review, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Santo Antonio, Texas, EUA, set. 29 a oct. 2002.

KÖNIG, R. et al. **Ultrasonic splitting of oil-in-water emulsions**. Acoustical Society of America. V. 105, n. 2, p. 1076-1077, feb. 1999.

KUMAR, K.; NIKOLOV, A. D.; WASAN, D. T. **Mechanisms of stabilization of water-in-crude oil emulsions**. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 40, n. 14, p. 3009–3014, jul. 2001.

LAURELL, T., PETERSSON, F., e NILSSON, A. **Chip integrated strategies for acoustic separation and manipulation of cells and particles**. Chemical Society Reviews, V. 36, n. 3, p. 492-506, set. 2007.

LEE, J.; KENTISH, S.E.; ASHOKKURNAR, M. **The effect of surface-active solutes on bubble coalescence in the presence of ultrasound**. Journal of Physical Chemistry B. v. 109, n. 11, p. 5095-5099, mar. 2005.

LOBO, L.; IVANOV, I.; WASAN, D. **Dispersion coalescence**: kinetic stability of creamed dispersions. AIChE J., v. 39, n. 2, p. 322–334, fev.1993.

MANDRALIS, Z. et al. **Enhanced synchronized ultrasonic and flow-field fractionation of suspensions**. Ultrasonics, v. 32, n. 2, p. 113–121, mar. 1994.

MIDTTUN, O. et al. **Multivariate screening analysis of water-in-oil emulsions in high external electric fields as studied by means of dielectric time domain spectroscopy** - III - Model emulsions containing asphaltenes and resins, Journal of Colloid and Interface Science, v. 227, n. 2, p. 262-271, jul. 2000.

MOHAMMED, R. A.; BAILEY, A. I.; LUCKHAM, P. F. **Dewatering of crude-oil emulsions 1**. Rheological behavior of the crude-oil water interface. Colloids and

Surfaces A - Physicochemical and Engineering Aspects, v. 80, n. 2-3, p. 223-235, dec. 1993.

MORTIMER, B. et al. **High power resonant tracking amplifier using admittance locking**. Ultrasonics, v. 39, p. 257-261, jan. 2001.

NII, S.; KIKUMOTO, S.; TOKUYAMA, H. **Quantitative approach to ultrasonic emulsion separation**. Ultrasonics Sonochemistry, v. 16, n. 1, p. 145–149, jan. 2009.

NILSSON, A. et al. **Acoustic control of suspended particles in micro fluidic chips**. Lab on a Chip. v. 4, n. 2, p. 131-135, 2004.

NOWOTNY, H.; BENES, E. **General one-dimensional treatment of the layered piezoelectric resonator with 2 electrodes**, Journal of the Acoustical Society of America, v. 82, n. 2, p. 513–521, ago. 1987.

OLYMPUS. Ultrasonic transducers, Pana_UT_EN_201012, 2011, EUA, 49 p.

PAL, R. **Techniques for measuring the composition (oil and water-content) of emulsions** - a state-of-the-art review. Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects, v. 84, n. 2-3, p. 141–193, mai. 1994.

PALERMO, T. **Le phénomène de coalescence**. Etude bibliographique Coalescence Phenomena. A Review, Oil & Gas Science and Technology, v. 43, n. 3, p. 325, 1991.

PANGU, G. D.; FEKE, D. L. **Acoustically aided separation of oil droplets from aqueous emulsions**. Chemical Engineering Science, v. 59, n. 15, p. 3183–3193, ago. 2004.

PANGU, G. D.; FEKE, D. L. **Droplet transport and coalescence kinetics in emulsions subjected to acoustic fields**. Ultrasonics, v. 46, n. 4, p. 289–302, nov. 2007.

PANGU, G. D.; FEKE, D. L. **Kinetics of ultrasonically induced coalescence within oil water emulsions modeling and experimental studies**. Chemical Engineering Science, v. 64, n. 7, p. 1445–1454, abr. 2009.

PARVASI, P. et al. **A Comparative Study on droplet coalescence in heavy crude oil emulsions subjected to microwave and ultrasonic fields**. Separation Science and Technology, v. 48, n. 11 p. 1591-1601, jun. 2013.

PEÑA, A. A. **Dynamic Aspects of Emulsion Stability**, Tese (Doutorado), Rice University, Houston, ago. 2004.

PEÑA, A.A.; HIRASAKI G.J.; MILLER C.A. **Chemically Induced Destabilization of Water-in-Crude Oil Emulsions**, Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 44, n. 5, p. 1139-1149, 2005.

RAMOS-FERNANDEZ, R., GALLEG0-JUAREZ, J.A. **Automatic system for dynamic control of resonance in high power and high Q ultrasonic transducers**. Ultrasonics, v. 23, p. 151-156, jul. 1985.

ROMMEL, W.; MEON, W.; BLASS, E. **Hydrodynamic Modeling of Droplet Coalescence at Liquid-Liquid Interfaces**, Separation Science and Technology, v. 27, n. 2, p. 129–159, jan. 1992.

ROSENBAUM, J. **Bulk acoustic wave theory and devices**, Boston Artech House Inc., EUA, 462 p., 1988, ISBN 0-89006-265-X.

SALAGER, J.L. **Formulación, composición y fabricación de emulsiones para obtener las propiedades deseadas**. estado del arte. parte B. propiedades de las emulsiones y su medición, Cuaderno FIRP S747-B, Universidad de los Andes, Cuaderno FIRP S747-B, Venezuela, 1999.

SALAGER, J.L. **Emulsion Phase Inversion Phenomena**, em emulsions and emulsion stability, Sjöblom J. Editor, Surfactant Science Series, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.

SAWARKAR, A. N. et al. **Use of ultrasound in petroleum residue upgradation**. Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 87, n. 3, p. 329-342, jun. 2009.

SCHRAMM, L. L. **Emulsions fundamentals and applications in the petroleum industry**, Série: Advances in Chemistry Series 231, Petroleum Recovery Institute, American Chemical Society, Washington DC, 1992.

SILVA, A. M. **Aplicação do ultrassom na coalescência de emulsões água em óleo**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2013.

SJÖBLOM, J. **Encyclopedia handbook of emulsion technology**, Marcel Dekker Inc., Nova Iorque, 2001.

SJÖBLOM, J. et al. **Our current understanding of water-in-crude oil emulsions. Recent characterization techniques and high pressure performance**. Advances in Colloid and Interface Science, v. 100, n. SI, p. 399-473, fev. 2003.

SUN, D. Z.; DUAN, X. D.; LI, W. X. **Demulsification of water-in-oil emulsion by using porous glass membrane**. Journal of Membrane Science, v. 146, n. 1, p. 65-72, jul. 1998.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Interciência, 2004, 271 p. ISBN 8571930996.

TIERSTEN, H. F. **Thickness vibrations of piezoelectric plates**. Journal of the Acoustical Society of America, v. 35, n. 1, p. 53–8, 1963.

TOBIN, T. et al. **Determination of coalescence frequencies in liquid-liquid dispersions** - effect of drop size dependence. Chemical Engineering Science, v. 45, n. 12, p. 3491–3504, 1990.

TOLT, T. L.; FEKE, D. L. **Separation of dispersed phases from liquids in acoustically driven chambers**. Chemical Engineering Science, v. 48, n. 3, p. 527–540, fev. 1993.

VAN RUTH, S. M. et al. **Influence of composition and structure of oil-in-water emulsions on retention of aroma compounds**. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 82, n. 9, p. 1028–1035, jul. 2002.

WANG, Y.; et al. **A study of interfacial dilational properties of two different structure demulsifiers at oil–water interfaces**, Journal of Colloid and Interface Science, v. 270, n. 1, p. 163-170, fev. 2004.

WEIGHT, J.P. **Ultrasonic beam structures in fluid media**, Journal of the Acoustical Society of America, v. 76, n. 4, p. 3075-3089, jun. 1994

WOODSIDE, S. M. et al. **Acoustic force distribution in resonators for ultrasonic particle separation**. Aiche Journal, v. 44, n. 9, p. 1976–1984, set. 1998.

YEO, L.Y. et al. **Film drainage between two surfactant-coated drops colliding at constant approach velocity**. J. Colloid Interface Sci., v. 257, n. 1, p. 93–107, jan. 2003.

ZHENG, X. Y.; APFEL, R. E. **Acoustic interaction forces between two fluid spheres in an acoustic field**. Journal of the Acoustical Society of America, v. 97, n. 4, p. 2218–2226, abr. 1995.

ANEXOS

**ANEXO A – PLANOS PRELIMINARES DO PROTÓTIPO SEM FLUXO,
TAMPA (PEÇA 1) E RECIPIENTE (PEÇA 2).**

Peça 1.

Peça 2.

Nota 1: As dimensões que representam as camadas do ressonador devem ter precisão de centésimos de milímetro.

Nota 2: Deve-se garantir paralelismo entre o fundo do recipiente e a face inferior da tampa.

ANEXO B – CÉLULA DE COALESCÊNCIA EM FLUXO

B-B

Nota 1: As dimensões que representam as camadas do ressonador devem ter precisão de centésimos de milímetro.

Nota 2: Deve-se garantir paralelismo entre faces internas de 130 mm da cavidade.

ANEXO C – FUNCIONAMENTO DO CONTROLE DE POTÊNCIA E SEGUIMENTO DE FREQUÊNCIA

O controle de seguimento de frequência segue os desvios dos picos de ressonância da condutância elétrica, devido às variações de temperatura usando um algoritmo tipo *hill climbing* convencional. Esse algoritmo é uma técnica de otimização matemática de busca local e do tipo iterativo, que inicia com um dado valor, e em seguida, procura por uma melhor solução de forma incremental, variando um único parâmetro. Dessa forma, fazendo uma varredura na frequência de excitação dos transdutores podem ser localizados os picos de ressonância. Assim, o código generalizado desenvolvido no software Matlab® para determinar os picos de potência usando uma varredura em uma faixa de frequência determinada é o seguinte:

```
for k=1:Nstep           %inicio da varredura que procura a potência máxima

    %Comando para gerar a frequência de excitação na eletrônica
    gera_freq(Canal,freq(k));
    P(k)=0;

    %Medição das variáveis em cada frequência
    S=ler_todo;          %Comando que lê as variáveis na eletrônica
    V(k)=S(1);           %Tensão
    I(k)=S(2);           %Corrente
    PH(k)=S(3);          %Fase
    P(k)=P(k)+(V(k)*I(k)*cos(PH(k)*pi/180)); %Calculo da potência

    % Determinação da Potência máxima e a frequência onde ocorre
    if P(k)>Pmax
        Pmax=P(k);       %Potência máxima
        Fmax=freq(k);    %Frequência onde ocorre o Pmax
    end
end                     % Fim da varredura que procura o Pmax
```

Na interface desenvolvida para o sistema de controle de potência e seguimento de frequência podem ser ajustados todos os parâmetros de operação (Ver Anexo D). Além do seguimento da frequência de ressonância mencionado no item 6.3, dois pontos adicionais devem ser abordados. Primeiro, a frequência de excitação dos transdutores 1 e 2 deve permanecer em uma faixa de operação que evite a ressonância de cada transdutor (Ver Figura C.1).

Figura C.1 – Diagrama de operação do controle de potência e seguimento de frequência

A faixa de operação está sinalizada em vermelho na Figura C.2 para o transdutor 1 da célula em fluxo (1,09 - 1,15 MHz). Nessa região, pode ser fornecida potência para a célula sem a existência de correntes de excitação elevadas e os modos, picos, de ressonância do líquido são bem definidos.

Se a frequência da ressonância for menor ao limite mínimo o ponto de operação é incrementado no valor da frequência fundamental (Δf na Fig. C.2). Nota-se que o salto entre dois picos consecutivos depende do comprimento da câmara e a velocidade de propagação do som no líquido. Nesse caso, esse valor é de 34,5 kHz. E no caso contrário, se a frequência do pico de ressonância for maior do que o limite máximo, o ponto de operação é diminuído em um Δf (Ver Figura C.1). O código generalizado no software Matlab[®] que mantém a operação da célula dentro de uma faixa de frequência estabelecido é o seguinte:

```
% Implementação do salto na frequência por atingir limite Máx. ou Mín.
if Fmax < 1.09e6 % limite mínimo
    Fmax = Fmax+34.5e3;
end
if Fmax > 1.15e6 % limite máximo
    Fmax = Fmax-34.5e3;
end
```

O segundo problema ocorre quando a célula está operando com alta potência. Os gradientes de temperatura gerados no interior da cavidade reduzem a amplitude dos picos de ressonância e geram outros máximos locais perto do pico principal (Ver Fig. 6.3). Para evitar os máximos locais fora da frequência de ressonância duas

varreduras são necessárias. Por exemplo, o controle de frequência faz uma varredura base, menor, de 1,5 kHz um determinado número de vezes, ciclos , e depois é realizada uma varredura de verificação, maior, de 20 kHz ao redor do último valor máximo determinado, para constatar se o ponto onde está operando seja o pico de ressonância e não um máximo local (Ver Figura C.1). Um ponto inicial deve ser selecionado para fazer uma primeira varredura na frequência de excitação dentro da faixa de frequência de operação (Ver Fig. C.1 e ANEXO D). A Figura C.3 demonstra a variação em porcentagem da potência fornecida pela fonte e a frequência escolhida pelo sistema de controle, ambas as curvas em função dos ciclos de operação. Nessas curvas, aparecem ressaltadas em vermelho as varreduras de verificação.

Figura C.3 – Frequência selecionada pelo sistema de controle (superior) e variação da potência fornecida pela fonte (inferior).

O código generalizado no software Matlab[®] é semelhante ao apresentado inicialmente para realização de uma varredura na frequência, porém, a linha que gera a frequência de excitação na eletrônica é diferente e aparece o controle de repetições de cada tipo de varredura. Sendo o Tpasso o número de pontos para trás e para frente do último pico de máximo encontrado, nos quais o algoritmo faz o seguimento do pico. O valor dessa variável é de 5 para realizar a varredura base, ou seja, uma varredura de 11 pontos incluindo o máximo na metade e seguir o deslocamento da frequência devido à variação da temperatura. O valor da variável é de 100 para

realizar a varredura de verificação, ou seja, uma varredura de 201 pontos incluindo o máximo na metade e garantir que o ponto onde esteja operando seja um pico de ressonância e não um máximo local (Ver Fig. C.1 e C.3). O Npaso é o número de ciclos que se repetem a varredura base ou a varredura de verificação, 500 vezes a primeira e uma vez a segunda. O código generalizado desenvolvido foi o seguinte:

```
for k=1:(2*Tpaso+1)      % Geração das frequências na saída
    %Comando para gerar a frequência de excitação na eletrônica
    gera_freq(Canal,Fmax+(k-(Tpaso*+1))*DCF);
... end
...
Tpaso=5;                % Varredura base
Npaso=500;              % Ciclos de varredura base
Npaso=Npaso-1;
if Npaso==0
    if Tpaso==5
        Tpaso=100;      % Varredura verificação
        Npaso=1;        % Ciclos de varredura verificação
    end
end
end
```

Como foi observado na Figura 6.10, a amplitude da condutância elétrica dos picos de ressonância varia com a mudança de temperatura. Por esse motivo, o sistema de controle também regula a tensão de excitação dos transdutores, aumentando-a ou diminuindo-a, para que a soma da potência entregue para os transdutores 1 e 2 seja um valor constante (Ver Figura C.1). O seguinte código generalizado foi usado para controlar a intensidade da potência:

```
% Implementação do controlador para manter a potência de saída fixa
Err = Psetpoint-Pmax;
if err>0
    aumenta_tensao(1); % Comando para incrementar a tensão da fonte 1%
else
    diminui_tensao(1); % Comando para reduzir a tensão da fonte 1%
end
```

Psetpoint, ou nível de potência no teste, é o valor de potência escolhido e ajustado inicialmente para manter ao longo da realização de um teste (Ver Figura C.1).

Problema da temperatura

A principal causa de variação dos picos de ressonância é a temperatura. Por isso, o sistema de controle deve ajustar a frequência de excitação dos transdutores 1 e 2

para corrigir as mudanças térmicas. A temperatura pode atuar das seguintes maneiras sobre a ressonância: primeiro a temperatura média do fluido produz um deslocamento na frequência central da ressonância. Segundo, quando os transdutores piezelétricos estão operando geram pontos quentes à frente dos mesmos. Isso provoca variações locais das propriedades do fluido, reduzindo a amplitude do pico de ressonância e gerando máximos e mínimos locais devido às variações das propriedades do fluido. Finalmente, quando a célula opera com fluxo, gera-se um gradiente de temperatura entre a entrada e a saída da cavidade ressonante. O fluido sai com uma temperatura maior, dependendo da vazão e da potência empregada no teste.

Eletrônica de controle

Figura C.4 – Diagrama de operação da eletrônica de controle.

A comunicação entre o sistema eletrônico de controle de potência e seguimento de frequência, e um computador com o software Matlab[®] instalado é realizada através de um cabo RS232, porta serial da eletrônica, para USB, porta no computador. Uma verificação da comunicação entre a eletrônica e o código é realizada antes de executar qualquer uma das operações do controlador. O ciclo de operação do sistema de controle é realizado de acordo com a seguinte sequência: primeiro, os transdutores piezelétricos da célula de coalescência em fluxo são excitados através de um sistema amplificador de potência, depois disso, a frequência de operação é definida no gerador de função de onda quadrada. Esse último sinal é ajustado através de um circuito RLC de casamento para conseguir uma excitação sinusoidal nos transdutores. Finalmente, com o valor da tensão de excitação conhecido, o qual é definido inicialmente na interface do controle, a corrente e sua fase em relação à

tensão de excitação são medidas para calcular a potência fornecida para a célula de separação. A seguinte figura apresenta um diagrama de operação da eletrônica.

Três versões do sistema eletrônico de controle foram fabricadas no Laboratório de Ultrassom da Universidade de São Paulo, a versão protótipo e a final são apresentadas na Figura C.5.

Figura C.5 – Versão protótipo e final da eletrônica de controle

Protótipo

Final

ANEXO D – OPERAÇÃO DO CONTROLE DE POTÊNCIA E SEGUIMENTO DE FREQUÊNCIA

O controle de seguimento de frequência segue aos desvios dos picos de ressonância usando um algoritmo tipo *hill climbing* convencional. Em resumo, ao se fazer uma varredura na frequência de excitação dos transdutores, os picos de ressonância podem ser localizados. Para realizar esse controle de forma autônoma, um código de programação foi desenvolvido no software MATLAB[®] cuja operação é descrita a seguir:

Abrir localização do programa de controle:

1. Buscar a localização do código de programação no “Current directory”.
2. Selecionar a pasta de localização do código, nesse caso: “C:\Coalescencia\control de celdaA_Eletronica_independente”

Para continuar, uma breve descrição dos arquivos contidos dentro da pasta, códigos de programação e dados dos testes, é apresentada:

- Arquivos terminados em “.mat” são arquivos que contem dados de saída.
- Arquivos terminados em “.m” são os códigos de programação do sistema de controle.

- Arch_imp.mat: arquivos onde são armazenados os dados das variáveis quando é feita uma varredura em frequência.
- Arch_cont12.mat: arquivos onde são armazenados os dados das variáveis quando é feito o processo de controle de potência na célula, em ambos os transdutores.
- Arch_cont12a.mat: arquivos onde são armazenados os dados das variáveis de uma varredura em frequência que faz o programa de controle de potência na célula automaticamente quando inicia.
- Arch_estado.mat: arquivos onde são armazenados os parâmetros com os quais foi ajustado o programa para operar, seja em varredura, controle, ou qualquer outra operação.

Os dados de uma execução do código, controle ou varredura, são sobrescritos em um arquivo de saída com o mesmo nome a cada operação. Por esse motivo, depois de terminado cada teste devem ser copiados os arquivos de saída, em outra pasta, para salvar os dados.

Execução da interface do programa de controle: O código de controle que abre a interface de operação deve ser inicializado digitando no campo “Command Window” no MATLAB® o nome do arquivo de controle “pot_climbing”, e clicar em “enter”.

Na figura a seguir é apresentada a interface do programa de controle da célula

Cada processo de operação do controle é inicializado quando apertado o botão “START”. Posteriormente, devem-se digitar os parâmetros de operação e confirmar os valores no final apertando o botão “OK”.

São descritas a seguir as opções de operação do controle numeradas na figura anterior.

- Varredura: realiza uma varredura em uma faixa de frequência de excitação especificada.

1. Varredura

- Freq. inicial: da varredura
- Passo de freq: Passo em Hertz para ir da Frequência inicial até a final
- Freq. final: da varredura

- Controle CH1: realiza o controle de potência e frequência somente no canal 1 da eletrônica. Inicialmente deve ser definida uma faixa de frequência onde tem sido observada a existência de um pico através de uma varredura simples.

2. Controle CH1

- Freq. inicial: do controle para encontrar ponto ótimo de operação
- Passo: Passo em Hertz para ir da Frequência inicial até a final
- Freq. final: do controle
- Depois de ter digitado a faixa de frequência para o CH1, é digitado o valor da potência a ser mantida durante a realização do teste (operação).

1.

2.

- Controle CH2: realiza o controle de potência e frequência somente no canal 2 da eletrônica. Inicialmente deve ser definida uma faixa de frequência onde tem sido observado que existe um pico através de uma varredura simples.

3. Controle CH2

- Freq. inicial: do controle para encontrar ponto ótimo de operação
- Passo: Passo em Hertz para ir da Frequência inicial até a final
- Freq. final: do controle
- Depois de ter digitado a faixa de frequência para o CH2, é digitado o valor da potência a ser mantida durante a realização do teste.

- Controle potência CH1 e CH2: realiza o controle de potência e frequência em ambos os canais simultaneamente da eletrônica. Inicialmente deve ser definida uma faixa de frequência onde tem sido observada a existência de um pico através de uma varredura simples.

4. Controle CH1 e CH2

- Freq. inicial: do controle para encontrar ponto ótimo de operação
- Passo: Passo em Hertz para ir da Frequência inicial até a final
- Freq. final: do controle
- Depois de ter digitado a faixa de frequência para o CH1 e CH2, é digitado o valor da potência a ser mantida durante a realização do teste.

- Fixo CH1: opera com valor de potência e de frequência fixos, mas, ambos os valores podem ser alterados manualmente durante o teste usando os botões na parte inferior.

5. Potência fixa no CH1

- Frequência: Ajustar valor fixo da frequência

- Fixo CH2: opera com valor de potência e de frequência fixos, mas, ambos os valores podem ser alterados manualmente durante o teste usando os botões na parte inferior.

6. Potência fixa no CH2

- Frequência: Ajustar valor fixo da frequência

- Fixo 1 e 2: opera com valor de potência e de frequência fixos em ambos os canais, mas, ambos os valores podem ser alterados manualmente durante o teste usando os botões na parte inferior.

7. Potência fixa no CH1 e no Ch2

- Frequência CH1: Valor fixo de frequência do CH1
- Frequência CH2: Valor fixo de frequência do CH2

- Alteração da frequência durante um teste para qualquer um dos tipos de operação fixa.

- Depois de iniciado um teste de frequência fixa, é possível mudar o valor da frequência manualmente com as setas indicadas.

- Configuração: A porcentagem da tensão de excitação pode ser alterada antes de iniciar qualquer um dos testes. É sugerido na realização de um teste com alta potência, ajustar um valor da tensão da fonte acima de 50. O valor do filtro do sinal foi escolhido experimentalmente, é altamente recomendado não alterar.

8. Configuração

- Tensão da fonte: Porcentagem da tensão de excitação que vai ser fornecida pela fonte de tensão
- Filtro: Filtro do sinal coletado da célula (256, NÃO MUDAR)

- Alteração da tensão de excitação durante um teste para qualquer um dos tipos de operação fixa.
- Depois de iniciado um teste de frequência fixa, é possível mudar o valor da tensão manualmente com as setas assinaladas.
- NOTA: Estes botões também funcionam para os testes de controle, mas, interferem na sua operação.