



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós Graduação em Engenharia Química



**Projeto e Operação em Escala Semi-industrial de
um Equipamento para Tratamento de Águas
Produzidas na Indústria do Petróleo Utilizando
Nova Tecnologia: Misturador-Decantador à
Inversão de Fases (MDIF).**

Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Araujo Paulo

Natal, Dezembro de 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

TESE DE DOUTORADO

**Projeto e Operação em Escala Semi-industrial de
um Equipamento para Tratamento de Águas
Produzidas na Indústria do Petróleo Utilizando
Nova Tecnologia: Misturador-Decantador à
Inversão de Fases (MDIF).**

Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

FERNANDES JR., Wilaci Eutrópio Fernandes – Projeto e Operação em Escala Semi-Industrial de um Equipamento para Tratamento de Águas Produzidas na Indústria do Petróleo Utilizando Nova Tecnologia: Misturador-Decantador à Inversão de Fases - MDIF. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Área de Concentração: Termodinâmica e Processos de Separação.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Araújo Paulo

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo utilizar uma nova tecnologia no tratamento de águas produzidas da indústria do petróleo. Uma Unidade de Tratamento de Águas Produzidas, denominada UT-MDIF, foi projetada, instalada e operou dentro de uma planta industrial de tratamento de efluentes de petróleo. Esta Unidade de Tratamento piloto utiliza o *método de separação à inversão de fases* e pode se tornar numa alternativa promissora para resolver o problema de separação óleo/água. Este método constitui a base do funcionamento de um novo modelo de misturador-decantador de configuração vertical e que ocupa pequena área superficial. Esta última característica se torna especialmente importante, quando existe limitação de espaço no lay-out da planta industrial, por exemplo, uma plataforma marítima para exploração de petróleo. Este equipamento em escala semi-industrial trata águas produzidas contaminadas com petróleo em baixas concentrações da ordem de 30 a 150 mg/L e vazões efetivas de 320 m³/d (47,4m³m⁻²h⁻¹). Os bons resultados na separação óleo/água, obtendo-se a especificação necessária para descarte, associado à não dependência da eficiência de separação face à salinidade do meio, podem tornar o equipamento uma nova tecnologia no tratamento de águas contaminadas com óleo a baixas concentrações.

Palavras chaves: Processo de Separação; Nova tecnologia; Misturador-decantador; Produção mais limpa; Engenharia ambiental.

BANCA EXAMINADORA E DATA: 19 de dezembro de 2006

Presidente: Prof. Dr. João Bosco de Araújo Paulo – UFRN-DEQ

Membros: Prof. Dr. Marcelo Borges Mansur – UFMG-DEQ

Dr. Marcel Vasconcelos Melo – PETROBRAS/CENPES

Prof. Dr. Henio Normando de Souza Melo – UFRN-DEQ

Prof. Dr. Tarcílio Viana Dutra Júnior – UFRN-DEQ

FERNANDES JR., Wilaci Eutrópio Fernandes - Design and Operation in a Semi-Industrial Scale of an Equipment for Treat Produced Waters in the Oil Industry using a New Technology: Mixer-settler based on Phase Inversion – MDIF. Program of Graduate Degree in Chemical Engineering – UFRN- Natal/RN – Brazil.

ABSTRACT: The aim of this work is to use a new technology in the treatment of produced wastewaters from oil industry. An unit for treat produced waters called UT-MDIF, was designed, installed and operated in an industrial plant for treatment of effluents from oil industry. This unit operates by means of the method of separation of phase inversion and can become a promising alternative to solve the problem of oil/water separation. This method constitutes the basis of the working of a new design of mixer-settler of vertical configuration which occupies small surface area. The last characteristic becomes specially important when there is limitation on the lay-out of the plant, for example, over maritime platforms to explore oil. This equipment in a semi-industrial scale treats produced wastewaters contaminated with oil at low concentrations (ranging from 30 to 150 mg/L) and throughputs of 320 m³/d (47,4 m³ m⁻² h⁻¹). Good results were obtained in oil/water separation which leads to the necessary specification to discharge those wastewaters. Besides, the non dependence of the efficiency of separation in spite of the salinity of the medium becomes the equipment an attractive new technology to treat wastewaters containing oil at low concentrations.

Keywords: Separation Process; New technology; Mixer-settler; Environmental Engineering; Clean Production.

ÍNDICE

Figuras	iv
Tabelas	x
Siglas e Nomenclatura	xiii
1. Introdução	1
2. Objetivos	4
3. Aspectos Teóricos e Revisão da Literatura	5
3.1. O Petróleo	5
3.1.1. Origem e formação do petróleo	6
3.2. Águas produzidas	7
3.2.1. Formação das emulsões com o petróleo.....	8
3.2.2. Equipamentos mais usuais no tratamento das emulsões óleo/água....	10
3.3. Extração líquido-líquido	11
3.3.1. Operações de mistura	12
3.3.2. Equipamentos para a extração líquido-líquido.....	14
3.3.3. Misturadores-decantadores (<i>mixer-settlers</i>).....	15
3.4. Misturador-decantador à inversão de fases (MDIF)	17
3.4.1. Método da Inversão de Fases	17
3.4.2. Trabalhos anteriores com o MDIF.....	21
3.4.3. Hidrodinâmica do MDIF	25
3.4.3.1. Hidrodinâmica da Câmara de Mistura	27
3.4.3.2. Hidrodinâmica do Prato Perfurado	30
3.4.3.3. Hidrodinâmica da Câmara de Decantação	33
3.5. Extrapolação de escala	38
3.5.1. Extrapolação de escala de misturadores	40
3.5.2. Natureza do projeto.....	41
3.5.3. Códigos, Normas e Fatores de Segurança.....	42
3.5.4. Materiais de Construção	43
3.6. Planejamento experimental e otimização de experimentos	43
3.6.1. Planejamento fatorial em dois níveis	45

3.6.2. Análise da Variância	47
3.6.3. Distribuição F	48
3.6.4. Método do valor P	49
3.6.5. Metodologia da Superfície de Resposta	49
3.6.6. Ajuste e Interpretação de Modelos de Segunda Ordem	50
3.6.6.1. Planejamentos para o Ajuste de Modelos de Segunda Ordem	50
3.6.7. Planejamento Central Composto.	51
4. Materiais e Métodos.....	54
4.1. Etapa de laboratório.....	54
4.1.1. Propriedades físico-químicas das fases fluidas.....	54
4.1.2. Testes com o equipamento em laboratório.....	55
4.1.2.1. Metodologia para a medida do diâmetro da gota transportadora	55
4.1.2.2. Metodologia para a realização dos testes de eficiência	57
4.1.2.2.1. Sistema Estudado.	58
4.1.2.2.2. Método Analítico	59
4.1.2.2.3. Programas Computacionais	59
4.1.2.2.4. Procedimento Experimental	59
4.1.2.2.5. Formulação do Planejamento Central Composto	62
4.1.2.2.5.1. Porção fatorial do planejamento (n_f)	63
4.1.2.2.5.2. Porção axial do planejamento (n_a)	63
4.1.2.2.5.3. Porção central do planejamento (n_c)	64
4.1.2.2.5.4. Número total de ensaios do planejamento central composto.	64
4.1.2.2.5.5. Aleatorização dos testes.....	65
4.2. Extrapolação da escala do equipamento de laboratório para o campo....	66
4.3. Construção dos equipamentos e montagem da unidade no campo.....	67
4.3.1. Construção dos equipamentos e montagem da UT-MDIF.....	68
4.3.2. Transporte da Unidade UT-MDIF da fábrica ao Pólo Guamaré	72
4.3.3. Instalação e montagem da UT-MDIF no Pólo Guamaré	73
4.3.4. Lavagem das linhas e teste hidrostático da UT-MDIF	75
4.4. Metodologia para os testes de campo com a UT-MDIF.....	78
4.4.1. Sistema Estudado	78

5. Resultados e Discussão	81
5.1. Laboratório: propriedades físico-químicas	82
5.2. Laboratório: medida do tamanho da gota transportadora.....	85
5.2.1. Análise hidrodinâmica da medida de gotas.....	89
5.2. Laboratório: Eficiência de Separação para os testes.	91
5.2.1. Análise hidrodinâmica para os testes de laboratório	92
5.2.1.1. Hidrodinâmica da Câmara de Mistura	92
5.2.1.2. Hidrodinâmica do prato perfurado	94
5.2.1.3. Hidrodinâmica da câmara de decantação	95
5.2.2. Análise estatística para os testes de laboratório	98
5.2.2.1. Análise de significância estatística para as variáveis independentes	98
5.2.2.2. Equação do Modelo para o MDIF-laboratório	99
5.2.2.3. Análise da variância do modelo Estatístico.....	100
5.2.3. Análise das Superfícies de Resposta.....	102
5.3. Testes de campo com a UT-MDIF.....	105
5.3.1. Hidrodinâmica do Equipamento de campo	105
5.3.1.1. Hidrodinâmica da Câmara de Mistura	105
5.3.1.2. Hidrodinâmica do prato perfurado	107
5.3.1.3. Hidrodinâmica da câmara de decantação	109
5.3.2. Planejamento estatístico experimental para os testes de campo.....	112
5.3.2.1. Resultados e discussão específicos dos testes de campo.....	113
5.3.3. Hidrodinâmica para a eficiência de separação dos testes de campo....	115
5.3.4. Equação do Modelo para os testes de campo	118
5.3.5. Análise das superfícies de resposta e curvas de nível	119
5.3.6. Principais problemas encontrados durante os testes de campo	122
5.3.6.1. Problemas decorrentes da composição da água produzida	122
5.3.6.2. Problemas decorrentes do arraste de água para o vaso acumulador..	124
5.3.7. Análise da operação e testes de campo	124
5.3.8. Deslocamento e modelagem da área de maior eficiência de separação	126
5.3.8.1. Resultados e discussão sobre os testes na região de deslocamento....	127
5.3.8.2. Análise de significância estatística para as variáveis independentes..	130

5.3.8.3. Equação do Modelo para a região de maior eficiência de separação	131
5.3.8.4. Análise da variância do modelo Estatístico.....	131
5.3.8.5. Análise das superfícies de resposta	133
5.3.9. Análise da composição do orgânico após conclusão dos testes	135
5.3.10. Simulações com a equação do modelo gerada	136
5.3.11. Considerações sobre o deslocamento da eficiência de separação	141
6. Conclusões.....	143
7. Referências bibliográficas	146
Anexos	155
1. Metodologia para a realização das análises do sistema em estudo	155
2. Memória de Cálculo para a Extrapolação de escala da UT-MDIF	162
3. Parte da tabela de pontos de percentagem da distribuição F, 5%.....	192
4. Comparativo entre artigos de planejamento experimental.....	193
5. Ficha técnica do material da Fibra de vidro estrutural	194
6. Fluxograma de processo	196
7. Fluxograma de engenharia	197

LISTA DE FIGURAS

Número	Descrição	Página
3.1	Misturador-decantador convencional	16
3.2	Inversão das fases no prato perfurado	18
3.3	Princípio de funcionamento do misturador-decantador à inversão de fases	19
3.4	Partes componentes do misturador-decantador à inversão de fases	20
3.5	Modelo translacional da gota do orgânico no interior da gota do aquoso	35
3.6	Escoamento da gota transportadora em leite orgânico	36
3.7	Diagrama de blocos interligando os fatores às respostas	45
4.1	Representação da calibração da sonda fotoelétrica	56
4.2	Representação da técnica de medida das gotas transportadoras	56
4.3	Esquema de operação com o MDIF	59
4.4.	Tomada de amostra na saída de água tratada do MDIF	61
4.5	Tomada de amostra da água oleosa na saída do tanque	62
4.6	Vaso de armazenagem do orgânico.	68
4.7	Câmara de Separação em construção	69
4.8	Reator da Câmara de Mistura em construção	69
4.9	Prato perfurado em construção	71
4.10	UT-MDIF em montagem sobre skid metálico	71
4.11	Operação de içamento do skid.	72
4.12	Chegada da carreta transportando o skid ao Pólo de Guamaré	73
4.13	Montagem do sistema elétrico da UT-MDIF	74
4.14	Montagem da coluna da UT-MDIF	74
4.15	Montagem do reator de mistura do equipamento de campo	75
4.16	Preparação para a lavagem das linhas e equipamentos	76
4.17	Etapa final de limpeza das linhas e equipamentos	76
4.18	Teste hidrostático das linhas e equipamentos do processo	77

4.19	UT-MDIF montada e operando na ETE do Pólo Guamaré/RN	78
5.1	Diâmetro da gota transportadora em função da presença de agitação na câmara de mistura.	87
5.2	Diâmetro médio da gota transportadora em função da vazão efetiva.	88
5.3	Diâmetro médio da gota transportadora em função da relação O/A.	88
5.4	Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada no reator da câmara de mistura em função da agitação e da relação O/A.	94
5.5	Valores preditos em relação aos valores observados nos testes para a eficiência de separação do MDIF - laboratório.	101
5.6	Curvas de Nível: <i>vazão total</i> e velocidade de <i>agitação</i> ($X_{rel} = 1/6$)	103
5.7.	Curvas de Nível: <i>vazão total</i> e velocidade de <i>agitação</i> ($X_{rel} = 1/5$)	103
5.8	Curvas de Nível: <i>vazão total</i> e velocidade de <i>agitação</i> ($X_{rel} = 1/3$)	104
5.9	Curvas de Nível: <i>vazão total</i> e velocidade de <i>agitação</i> ($X_{rel} = 2/5$)	104
5.10	Curvas de Nível: <i>vazão total</i> e velocidade de <i>agitação</i> ($X_{rel} = 1/2$)	104
5.11	Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada no reator da câmara de mistura em função da agitação e da relação O/A.	107
5.12	Valores preditos versus observados para a eficiência de separação nos testes de campo da UT-MDIF.	118
5.13	Superfície de Resposta: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> (Vazão $13,4\text{m}^3/\text{h}$; $2,0\text{m}$)	119
5.14	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> . (Vazão $6,6\text{m}^3/\text{h}$; $2,0\text{m}$)	120
5.15	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> . (Vazão $8,0\text{m}^3/\text{h}$; $2,0\text{m}$)	121

5.16.	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 10,0m ³ /h;2,0m)	121
5.17	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 12,0m ³ /h;2,0m)	121
5.18	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 13,4m ³ /h; 2,0m)	122
5.19	Elemento filtrante limpo do filtro de descarga da bomba do aquoso	123
5.20	Elemento sujo do filtro de descarga da bomba do aquoso	123
5.21	Prato perfurado sujo da coluna da UT-MDIF	124
5.22	Valores preditos vs. observados para a área de maior eficiência	132
5.23	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> . (Vazão 11,7m ³ /h;2,0m)	133
5.24	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 12,0m ³ /h; 2,0m)	133
5.25	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 12,5m ³ /h; 2,0m)	134
5.26	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 13,0m ³ /h; 2,0m)	134
5.27	Curvas de Nível: <i>Agitação</i> vs. <i>Relação O/A</i> .(Vazão 13,3m ³ /h; 2,0m)	135
5.28	Eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 11,7m ³ /h e O/A de 1/6	137
5.29.	Eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 11,7m ³ /h e O/A de 1/3	137
5.30	Eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 11,7m ³ /h e O/A de 1/2	138
5.31	Eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 12,5m ³ /h e O/A de 1/6	138
5.32.	Eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 12,5m ³ /h e O/A de 1/3	138

5.33	Eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: $12,5\text{m}^3/\text{h}$ e O/A de 1/2	139
5.34	Gráfico da eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: $13,3\text{m}^3/\text{h}$ e O/A de 1/6	140
5.35	Gráfico da eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: $13,3\text{m}^3/\text{h}$ e O/A de 1/3.	140
5.36	Gráfico da eficiência de separação utilizando a equação do modelo gerada para as condições: $13,3\text{m}^3/\text{h}$ e O/A de 1/2.	141
A.1	Viscosímetro Ubbelohde	158
A.2	Método do anel de Du Noüy	160
A.3	Desenho esquemático de um reator em escala de laboratório e industrial	169
A.4	Conjunto principal do projeto do MDIF industrial	178
A.5	Esquema simplificado da UT-MDIF	191

LISTA DE TABELAS

Número	Descrição	Página
3.1	Equipamentos de extração líquido-líquido mais usuais	15
3.2	Propriedades físico-químicas do sistema querosene/água	30
3.3	Valores da razão de scale-up	39
3.4	Fatores para extrapolação de escala e projeto	40
3.5	Matriz para um planejamento fatorial de 2^3	47
3.6.	Análise de variância para o ajuste de um modelo linear com dois parâmetros	48
3.7	Parâmetros para a construção de planejamentos centrais	52
4.1	Valores reais e codificados das variáveis para testes de laboratório	63
4.2	Valores da porção fatorial do planej. central composto para o MDIF	63
4.3	Valores da porção axial do planejamento central composto - MDIF	64
4.4	Valores da porção central do planejamento central composto-MDIF	64
4.5	Valores codificados das variáveis e número total de ensaios	65
4.6	Principais dimensões do prato perfurado do equipamento de campo	70
5.1	Densidade, viscosidade, tensão superficial e interfacial fases fluidas	82
5.2	pH, turbidez, condutividade, alcalinidade e salinidade para a água	83
5.3	Quantidade de nitrogênio amoniacal nos orgânicos estudados	83
5.4	Valores de propriedades físico-químicas	85
5.5	Diâmetro médio das gotas transportadoras	86
5.6	Velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa) em função do D_{32}	96
5.7	Velocidade relativa e tempo de deslocamento gotas transportadas	97
5.8	Elevada significância estatística e estatisticamente significantes - laboratório	99
5.9	Análise de variância para o ajuste do modelo para o MDIF-laboratório	101
5.10	Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada de QAV	106
5.11	D_{32} , gerado para o sistema estudado Água de formação/ QAV	108

5.12	Velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa) em função do D_{32}	110
5.13	Velocidade resultante de deslocamento das gotas (fase dispersa) e o tempo de residência desta na câmara de decantação	111
5.14	Valores reais e codificados para as variáveis independentes (campo)	113
5.15	Valores das concentrações de óleo em água na entrada da UT-MDIF	114
5.16	Valores das concentrações de óleo em água na saída da UT-MDIF	114
5.17.	Resultados dos testes de campo válidos obtidos da UT-MDIF	115
5.18	Parâmetros hidrodinâmicos para os testes de campo do MDIF	116
5.19	Valores reais e codificados para as variáveis independentes dos testes na área de deslocamento	127
5.20	Valores das concentrações de óleo em água na entrada para os testes na região de maior eficiência da UT-MDIF	127
5.21	Valores das concentrações de óleo em água na saída para os testes na região de maior eficiência da UT-MDIF	128
5.22	Resultados dos testes válidos obtidos para a região de deslocamento	129
5.23	Fatores de elevada significância estatística e estatisticamente significantes resultantes dos testes na região de maior eficiência	130
5.24	Análise de variância para o ajuste do modelo para a área de maior eficiência da UT-MDIF	132
5.25	Propriedades físico-químicas do QAV utilizado nos testes UT-MDIF	135
A.1	Laboratórios e equipamentos ou métodos utilizados para análises complementares	161
A.2	Principais dimensões da câmara de decantação do equipamento de campo	163
A.3	Principais dimensões da câmara de mistura do equipamento de campo	165
A.4	Principais dimensões da câmara de separação do equipamento de campo	166
A.5	Principais dimensões do reator do equipamento de campo	167

A.6	Principais dimensões do misturador para o equipamento de campo	167
A.7	Principais dimensões do projeto do prato perfurado	177
A.8	Espessura mínima admissível para tubulações de aço carbono	182
A.9	Seleção de tubos de aço carbono	183
A.10	Temperatura limite do material	184
A.11	Lista de linhas da Unidade de Tratamento de Água Oleosa	184
A.12	Lista de válvulas utilizadas na UT-MDIF	185
A.13	Balanço material das principais correntes do processo do MDIF	186
A.14	Matriz de Intertravamento do processo da UT-MDIF.	189
A.15	Lista de instrumentos de monitoração, medição e controle do MDIF	190
A.16	Extrato da tabela de pontos de percentagem da distribuição F, 5%.	192
A.17	Comparativo entre artigos de planejamento experimental	193

SIGLAS E NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	- área da seção transversal, m^2
A/O	- Emulsão água em óleo ou orgânico
AMT	- Altura manométrica total, m
C_e	- concentração de óleo em água de entrada do MDIF, kg/m^3
C_s	- concentração de óleo em água de saída do MDIF, kg/m^3
d	- diâmetro da gota dispersa, m
d	- diâmetro do furo do dispersor, m
d	- diâmetro do impelidor do agitador, m
d_{32}	- diâmetro médio de Sauter em um vaso agitado, m
D	- diâmetro interno do vaso agitado ou reator, m
D_{32}	- diâmetro médio de Sauter da gota gerada em um prato perfurado, m
E	- eficiência de separação do MDIF, %
Eö	- Número d'Eötvos para o sistema do prato perfurado
F	- teste aplicado à equação de regressão
g	- constante gravitacional: $9,80 m/s^2$
H	- Altura do decantador, m
H	- Altura do reator
H_a	- Altura da base do reator ao impelidor
K	- número de variáveis de processo
K	- constante de posição do agitador (750 para agitação no centro)
MQ_r	- média quadrática residual
MQ_R	- média quadrática da regressão
N_{CR}	- Agitação mínima da dispersão de uma fase em outra, <i>rpm</i>
N_p	- constante para reator com defletores
N	- número total de orifícios do distribuidor
N	- velocidade rotacional do agitador, <i>rps</i>
N	- número total de ensaios do planejamento central composto

n_f	- número de ensaios da porção fatorial do planejamento central composto
n_α	- número de ensaios da porção axial do planejamento central composto
n_c	- número de ensaios da porção central do planejamento central composto
O/A	- relação volumétrica entre o orgânico e o aquoso m^3/m^3
O/A	- emulsão óleo ou orgânico em água
P	- Pressão interna, psi
P	- Potência transferida para o fluido
P	- valor de probabilidade
PLC	- Controlador Lógico Programável
Q	- vazão total pelo equipamento ou orifícios do distribuidor, m^3/s
Q_a	- vazão do aquoso, m^3/s
Q_o	- vazão do orgânico, m^3/s
R^2	- valor da regressão
Re_{agit}	- número de Reynolds para o agitador
SCH	- Série ou Schedule Number
S	- Tensão admissível do material, psi
t_R	- tempo de residência da gota transportadora no decantador, s
t_a	- tempo de residência da gota transportada no interior da transportadora, s
t_o	- tempo para o sistema entrar em regime, s
t_c	- tempo de operação da coluna, s
U_J	- velocidade de início de formação do jato pelo orifício, m/s
U_d	- velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa), m/s
U_r	- velocidade resultante de deslocamento das gotas em relação à fase contínua, m/s
U_c	- velocidade de deslocamento da fase contínua, m/s
U_a	- velocidade de deslocamento da gota do orgânico na transportadora, m/s
v_a	- velocidade ascendente da gota transportada, m/s
V_i	- valor real do fator i
V_M	- valor médio entre os valores reais dos níveis alto e baixo
V_A	- valor real para o nível baixo
V_B	- valor real para o nível alto
V_a	- volume de água arrastada pelo orgânico, m^3

v_a	- velocidade ascendente das gotas no MDIF, m/s
We_T	- número de Weber para a turbina, adimensional
We	- número de Weber para o prato perfurado, adimensional
X_i	- valor codificado para o nível do fator i
X_{rel}	- valor codificado da relação volumétrica entre o orgânico e o aquoso
X_{vaz}	- valor codificado da vazão total
X_{agit}	- valor codificado da agitação da câmara de mistura
\hat{Y}	- valor predito pela equação do modelo

Letras Gregas

β_e	- retenção da fase aquosa dentro do decantador na condição de inundação
β_1	- hipótese nula
$\beta_0, \beta_1, \beta_n$	- coeficientes da equação de regressão;
ϕ_K	- retenção da fase dispersa.
μ_c	- viscosidade da fase contínua, kg/m.s = Pa.s
ρ_c	- densidade da fase contínua, kg/m ³
ρ_d	- densidade da fase dispersa, kg/m ³
$\Delta\rho$	diferença de massa específica entre as fases, kg/m ³
σ	- tensão superficial ou interfacial: N/m ou kg/s ²

Siglas	Significado
ANOVA	- Análise de Variância de um Modelo
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio-Ambiente
ETE	- Estação de Tratamento de Efluentes
ETO	- Estação de Tratamento de Óleo
Petrobras	- Petróleo Brasileiro S.A.
PXA-1	- Plataforma de Xaréu 1
SAO	- Separador Água-Óleo
UT-MDIF	- Unidade de Tratamento de água oleosa utilizando o Método da Inversão de Fases
UPGN-I	- Unidade de Processamento de Gás Natural I
QAV	- Querosene de Aviação.

1. Introdução

A produção de petróleo comumente vem associada à água produzida que, em muitos campos produtores, tem um volume de produção muito maior que o do próprio petróleo.

O tratamento da água produzida objetiva recuperar uma parte deste óleo e especificar a água para reuso ou descarte. Os hidrociclones e a flotação são os processos mais utilizados para separar emulsões do tipo óleo/água na indústria do petróleo. A flotação objetiva recuperar as gotículas de óleo com base na hidrofobicidade natural que elas apresentam, enquanto que os hidrociclones procuram acelerar o processo de separação gravitacional por meio da força centrífuga.

As águas produzidas tratadas por estes equipamentos podem atingir teores da ordem de 5mg/L em campos terrestres. Nos campos marítimos, procura-se associar os tratamentos dos hidrociclones com a flotação para especificar a água para descarte.

Para a separação de dispersões com gotículas maiores que 100 μm ou menores que 20 μm existem equipamentos que tratam de forma adequada estas emulsões. Grandes problemas ocorrem quando se pretende tratar gotículas com diâmetro médio entre 20 e 100 μm , pois equipamentos que ocupam grande área superficial e de custos elevados devem ser utilizados.

No contexto de uma nova linha tecnológica e ambiental para as empresas de petróleo propõe-se o Misturador-Decantador à Inversão de Fases. Este equipamento visa resolver problemas fundamentais concernentes ao tratamento das águas produzidas emulsionadas com óleo, principalmente em plataformas marítimas de produção de petróleo. O seu *design* vertical ocupando pouco espaço nestas unidades de produção, as facilidades de operação, manutenção e automação são vantagens deste equipamento em relação aos equipamentos convencionais.

Capítulo Introdução

Os resultados promissores obtidos com uma unidade de laboratório do novo *design* de aparelho estimularam os pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - PPgEQ e técnicos da Petrobras a construir em escala piloto ou semi-industrial um protótipo de campo do novo separador.

O objetivo desta tese é realizar o projeto, a construção e a operação de uma unidade de tratamento de águas produzidas na indústria do petróleo utilizando o método da inversão de fases. O equipamento denominado MDIF (Misturador-Decantador à Inversão de Fases) trata por via físico-química parte da água afluyente à ETE onde os processos atualmente adotados têm se mostrado de alto custo. A operação de extração por solvente conduzida no equipamento, consiste em transferir o óleo disperso na água produzida para um solvente orgânico por meio de agitação mecânica. Depois da transferência procede-se a separação das fases *água tratada/solvente arregado em petróleo*. Esta separação se faz através de um decantador de disposição vertical e suficientemente compacto.

Os parâmetros dimensionais do protótipo de campo foram obtidos a partir de uma extrapolação de escala do equipamento de laboratório. Este último mostrou uma eficiência de separação de até 96% no tratamento de águas oleosas contendo óleo na concentração de 100 a 1500 ppm. O protótipo de laboratório foi desenvolvido para tratar vazões de até 100 L/h. As melhores separações para baixas concentrações em óleo, foram obtidas com relações O/A (volume de orgânico/volume água produzida) de 1/3.

O equipamento de campo foi projetado para funcionar com um fator de escala de 100 vezes, o que representa uma vazão média de 10 m³/h de líquidos. Todos os cálculos de extrapolação de escala levaram em consideração o tratamento de águas produzidas com concentrações de óleo na faixa de 50 a 150 ppm. O MDIF semi-industrial foi projetado para trabalhar de forma totalmente independente, não interferindo nas operações de tratamento de efluentes atualmente adotadas pela Petrobras UN-RNCE.

Este trabalho de Tese está dividido em 6 capítulos. O capítulo I é a introdução.

Capítulo Introdução

No capítulo II, apresentam-se os objetivos geral e específicos.

O capítulo III refere-se à revisão da literatura. A natureza das águas produzidas na indústria do petróleo, seus problemas, formas de tratamento convencionais e alternativas tecnológicas são apresentadas. A seguir faz-se uma revisão do estado da arte do equipamento e suas aplicações anteriores. Estuda-se também os métodos para a extrapolação, os fundamentos hidrodinâmicos relacionados ao equipamento, além do planejamento experimental aplicado para assegurar que os testes sejam significativos para fins preditivos.

O capítulo IV descreve os materiais e métodos empregados para a realização dos testes com o equipamento em laboratório e no campo. Relata-se de forma detalhada todo o procedimento de extrapolação de escala do equipamento de laboratório para o de campo, a instalação e montagem da Unidade de Tratamento pelo Método da Inversão de Fases (UT-MDIF), bem como a metodologia empregada na realização dos testes experimentais.

Apresenta-se no capítulo V os resultados e discussões relativas a hidrodinâmica do aparelho em laboratório e no campo, relacionando-as com o desempenho de separação do equipamento nas duas condições estudadas. Avaliam-se as melhores condições operacionais das variáveis estudadas para a obtenção da melhor eficiência de separação do equipamento de campo. Nesta fase, utiliza-se um modelo estatístico para se conhecer a região otimizada de operação.

No capítulo VI é realizada a conclusão do trabalho de tese, com ênfase na avaliação da extrapolação de escala e da eficiência de separação da nova Unidade de Tratamento em escala semi-industrial que está instalada no campo.

2. Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma nova tecnologia alternativa ao tratamento de águas produzidas na indústria do petróleo operando-se um novo protótipo de misturador-decantador em escala piloto ou semi-industrial.

2.1. Objetivos específicos

- a) Estudar em laboratório o sistema água produzida/orgânico similar ao de campo, avaliando a eficiência de separação do equipamento para baixas concentrações de petróleo em águas produzidas da ordem de 50 a 150mg/L;
- b) Projetar, construir, montar e operar no campo uma nova unidade de tratamento de águas produzidas através de um protótipo de misturador-decantador a inversão de fases. Dimensionar o aparelho em escala semi-industrial utilizando um método de extrapolação de escala com base nos estudos de laboratório;
- c) Avaliar a eficiência de separação para o equipamento piloto e as novas condições operacionais no campo;
- d) Modelar as condições operacionais do novo equipamento na região de máxima eficiência de separação;

3. Aspectos Teóricos e Revisão da Literatura

3.1. O Petróleo

Petróleo (do latim *petra* = pedra e *oleum* = óleo) é um mineralóide cuja viscosidade depende da composição primária do hidrocarboneto predominante. Quanto mais profundo o petróleo está mais ele é fluido, devido à quebra das moléculas pelo calor natural da crosta terrestre. Os mais viscosos e densos apresentam cor preta enquanto que os mais leves cores avermelhadas ou amareladas sob a luz transmitida. Sob luz refletida é geralmente verde, devido ao fenômeno da fluorescência causado pela presença de hidrocarbonetos aromáticos (LEINZ e AMARAL, 1975).

Chapman (1976) define o Petróleo como uma substância natural que ocorre no estado sólido, líquido ou gasoso, ou simultaneamente, constituída de hidrocarbonetos, que são compostos de hidrogênios e carbonos, com impurezas presentes. As séries dominantes são: as Parafínicas (cadeias abertas saturadas, com fórmula C_nH_{2n+2}) possui de 1 a 70 átomos de carbono; as Aromáticas (hidrocarbonetos cíclicos insaturados, cuja fórmula depende do número de anéis); as Naftênicas (cíclicos-parafínicos ou ciclanos, denominados de cadeia saturada) e as Olefinas (que não são produzidos naturalmente, mas em refinarias, cuja fórmula é a C_nH_{2n}). A massa específica varia, sendo geralmente menor ou igual a 1.000 kg/m^3 e, mais comumente, situa-se entre 750 a 900 kg/m^3 .

Merrits (1998) acrescenta que o petróleo é quimicamente diferente de carboidratos, proteínas e moléculas orgânicas, uma vez que a abundância de oxigênio nestes últimos não ocorre no petróleo. O autor enfatiza a importância do petróleo como fonte energética, informando que o mundo consome 20 bilhões de barris de óleo por ano. Entre os 950 bilhões de barris que podem ser recuperados com a tecnologia atual e os 500 bilhões que se estima recuperar com novas tecnologias, chega-se a 1450 bilhões de barris, quantidade suficiente para os próximos 70 anos. As reservas de gás natural são utilizáveis pelos

próximos 100 anos. O autor ressalta a importância do petróleo como fonte energética. Por outro lado ele reforça que a proteção ambiental é um dos fatores mais cobrados pela sociedade e que as áreas ricas em petróleo podem ser produtivas em atividades biológicas, o que leva a responsabilizar o produtor de petróleo por sua conservação e não agressão.

3.1.1. Origem e formação do petróleo.

Lissant (1983), Leinz e Amaral (1975), Chapman (1976), Lima (1996) e Merritts (1998) concordam que a origem do petróleo está associada ao acúmulo de substâncias orgânicas de natureza animal ou vegetal de habitat planctônico. Quanto ao ambiente de formação, este deve ser propício a uma vida intensa e possuir proteção posterior contra a oxidação e destruição bacteriana. O petróleo é gerado por transformações químicas, ativadas pelo aumento da pressão e temperatura.

Na formação, devido à grande mobilidade, ocorre a migração do óleo e gás a partir da rocha-mãe. As fases fluidas difundem-se por rochas permeáveis, acumulando-se em rochas porosas. Se houver sobre a formação armazenadora, uma rocha impermeável, esta funciona como uma armadilha aprisionadora, impedindo a evasão de líquidos e gases. Este movimento de migração está relacionado à diferença de densidade entre petróleo e água, e à compactação que é submetido todo o pacote sedimentar, onde o meio mais fluido escapa para zonas de menor pressão. As condições para formação da jazida são as seguintes:

- a) Existência de rocha-mãe ou rocha geradora;
- b) Incidência de fatores como: tempo, pressão e temperatura elevadas;
- c) Condições que permitam processos migratórios, tais como: presença de água, espaços grandes, não-capilares e intercomunicáveis (interstícios ou fissuras abertas);
- d) Existência de rocha reservatório com boa porosidade e boa permeabilidade;
- e) Presença de estruturas acumuladoras: dobras, falhas ou ambas;

3.2. Águas Produzidas

A água associada ao petróleo, denominada de água produzida, está presente em duas formas:

- a) livre – constitui uma fase diferente da fase óleo, não estando intimamente associada a este. Ocorre quando o diâmetro da gota favorece a coalescência. Sendo uma mistura instável pode ser separada por decantação;
- b) emulsionada – mistura íntima, relativamente estável entre óleo e água decorrente do cisalhamento do óleo em bombas, válvulas, equipamentos, etc., formando gotículas muito pequenas.

A água produzida é comumente salina e contém sólidos suspensos (areia, lodo, argila, outros silicatos, gipsita). Os teores de sais, expressos em concentração de NaCl, podem atingir 300.000 mg/L

Esta água possui uma grande quantidade de sais solúveis: carbonatos, sulfatos e cloretos de sódio, potássio, cálcio e magnésio. Esta composição favorece a corrosão, que é principalmente associada aos cloretos, e a incrustação que está associada aos sulfatos e carbonatos. Os sólidos presentes são liberados pela erosão das rochas ou são devidos a interações da água injetada com a formação. A solubilidade dos hidrocarbonetos na água aumenta com a temperatura e diminui com o aumento da salinidade (Araújo *apud* LIMA, 1996).

A presença da água é indesejada porque acarreta um maior custo de transporte; superdimensionamento de tubulações, bombas, tanques; maiores gastos de energia com transporte e armazenamento; problemas no refino; corrosão e incrustação nos equipamentos de produção e transporte (HUMBERTO e AZEVEDO FILHO, s.d.; CHAPMAN, 1976).

Lima (1996) identifica que as causas para a produção de água contida no reservatório são:

- a) poços de óleo perfurados próximos à interface óleo/água;

- b) poços produtores de óleo em etapa posterior de produção, em que houve avanço da frente de água até a coluna produtora;
- c) falha no revestimento do poço devido a uma cimentação mal feita em ponto acima da zona produtora de óleo, permitindo contato entre zonas;
- d) recuperação secundária, onde água na forma líquida ou de vapor é injetada no reservatório visando aumentar ou manter a produção de óleo.

Humberto e Azevedo Filho (s.d.) concordam com o citado anteriormente, mas reforçam que, além destas causas, é possível que a formação de cones de água devido à ascensão da interface água/óleo, também possibilite a produção de água.

3.2.1. Formação das emulsões com o petróleo.

Humberto e Azevedo Filho (s.d.) condicionam a geração de emulsão à presença de dois líquidos imiscíveis, à agitação entre eles e à presença de um agente emulsionante. A estabilidade da emulsão deve-se aos seguintes fatores: tipo e quantidade do agente emulsificante, que produz uma película resistente e espessa ao redor da gotícula, estabilizando a emulsão; características dos líquidos; percentagem da fase dispersa e idade da emulsão.

O tamanho das gotículas dispersas tem grande influência, uma vez que quanto menor o tamanho desta gotícula formada, maior será a área superficial total e maior a área de interface para atuação dos agentes emulsionantes. A quantidade da fase dispersa na fase contínua tende a desestabilizar a emulsão, assim, para um mesmo nível de agitação, uma maior quantidade da fase dispersa produz um número maior de gotículas por unidade de volume ou maior diâmetro, favorecendo a coalescência e a decantação. Com o aumento da idade da emulsão, aumenta a quantidade de dispersão da água na fase contínua óleo ou do óleo na fase contínua água.

Capítulo 3: Aspectos Teóricos e Revisão da Literatura

Após a separação das fases água/óleo, o óleo é encaminhado às refinarias enquanto que a água contendo óleo na forma emulsionada, óleo suspenso, óleo solúvel e sólidos em suspensão é tratada e descartada.

A emulsão óleo em água é estabilizada por compostos orgânicos solúveis na fase óleo tais como asfaltenos, resinas, ácidos orgânicos e compostos contendo nitrogênio, enxofre e oxigênio na molécula. Estes compostos migram para a interface óleo/água formando um filme ao redor das gotas de óleo que impedem a sua coalescência e dificultam a separação das fases (Andrade e Silva *apud* LIMA, 1996).

Para Lissant (1983), não é possível concluir se a emulsão já existe no reservatório de óleo ou se ela aparece quando o processo de recuperação começa. Segundo o autor não há resultados conclusivos. A emulsão é estabilizada por asfaltenos e íons da fase aquosa, assim como finos insolúveis nos sistemas água/óleo. Em um planejamento global deve-se considerar para a quebra da emulsão óleo/água: a temperatura, o pH, o tipo do agente desemulsificante, o tipo do equipamento de separação e o procedimento de separação, assim como a disposição econômica do material separado.

Bruning *apud* Lima (1996) relata que os constituintes heteroátomos também contribuem para o aumento da polaridade dificultando a separação água/óleo. A acidez do petróleo, bem como a sua maior polaridade, pode ser conseqüência da sua biodegradação por microorganismos que transformam as moléculas mais simples dos hidrocarbonetos (parafinas normais e ramificadas) em ácidos naftênicos. Para hidrocarbonetos aromáticos a oxidação produz principalmente fenóis. Outra importante característica do petróleo é o índice de acidez que mede o teor de ácidos orgânicos e inorgânicos no óleo. Os ácidos carboxílicos, em maior extensão, e os fenóis, carbazóis e indóis em menor extensão, são os maiores responsáveis pela emulsionabilidade do óleo.

3.2.2. Equipamentos mais usuais no tratamento das emulsões óleo/água

Thomas (2001) explica que o tratamento da água produzida, que contém óleo na forma emulsionada, tem por finalidade recuperar parte deste óleo e especificar a água para injeção, reaproveitamento ou descarte.

A flotação e os hidrociclones são os processos mais utilizados na indústria do petróleo para separar emulsões do tipo óleo/água.

O processo de tratamento com hidrociclones consiste em introduzir sob pressão a água oleosa tangencialmente no trecho de maior diâmetro do equipamento, direcionando-a internamente em fluxo espiral acelerado em direção ao trecho de menor diâmetro. A força centrífuga gerada força os componentes mais pesados (água e sólidos) contra as paredes, proporcionando um fluxo axial reverso no centro do equipamento contendo a fração menos densa que constitui o rejeito de óleo que é retirado pela parte superior do aparelho.

Tchobanoglous (1991) define a flotação como uma operação unitária usada para separar partículas sólidas ou líquidas de uma fase líquida. A separação é realizada introduzindo pequenas bolhas de gás (geralmente o ar) dentro da fase líquida. As bolhas colidem com as partículas de interesse e a força de empuxo é aumentada elevando as partículas até a superfície. Desta forma, partículas com densidade maior que a do líquido podem ser arrastadas até o topo. Partículas com densidade menor que a do líquido (óleo em água, por exemplo) são mais facilmente arrastadas, aumentando a eficiência do equipamento. Assim que as partículas são flotadas para a superfície, elas podem ser retiradas por pás coletoras.

A flotação por ar dissolvido necessita de uma grande área interfacial para instalação, bem como equipamentos auxiliares, tais como compressores de ar, bombas, misturadores, dispositivos mecânicos entre outros. Além destes, reagentes químicos são utilizados para adsorver na superfície das partículas preparando-as para a flotação, condição

esta que eleva os custos do tratamento. Devido às particularidades do processo, geralmente os reagentes químicos não são reaproveitados, elevando os custos com o tratamento.

3.3. Extração líquido-líquido

Coulson e Richardson (1968) descrevem a extração líquido-líquido como a separação dos constituintes misturados num líquido, por meio de um tratamento com um solvente extrator, no qual um ou mais dos componentes desejados se dissolvem preferencialmente neste solvente, podendo realizar-se como processo contínuo ou descontínuo. O processo de transferência do soluto do solvente inicial para o novo solvente extratante se dá através do mecanismo de difusão. Os processos requerem:

- a) Contato íntimo entre solvente e solução;
- b) Separação das duas fases resultantes;
- c) Remoção e regeneração do solvente de cada fase.

Foust et al (1982) definem a extração líquido-líquido como a transferência de um componente de uma solução para outra fase líquida que é relativamente insolúvel na primeira solução. Em muitos casos, os dois solventes são parcialmente solúveis um no outro, além do que a concentração do soluto pode influenciar na solubilidade mútua dos solventes.

Henley e Seader (1981) determinam que o solvente ideal deve ser não tóxico, de baixo custo, facilmente recuperável, relativamente imiscível, possuir densidade diferente da fase que contém o soluto e possuir grande afinidade com o próprio soluto de onde possa ser separado por destilação, cristalização ou outros meios devendo haver um equilíbrio entre seletividade e capacidade.

3.3.1. Operações de mistura

Coulson e Richardson (1996) denominam mistura ao movimento de uma substância de uma região para outra, objetivando homogeneizar e promover transferência de massa e calor. Mistura é uma das operações mais comuns em química, processamento e outras indústrias. O termo mistura é aplicado a processos usados para reduzir o grau de não uniformidade ou gradiente de certa propriedade de um sistema como concentração, viscosidade, temperatura entre outras.

A mistura líquida em uma fase ocorre quando líquidos miscíveis são misturados para se obterem produtos de desejada especificação. É utilizada quando a diferença de viscosidade é grande.

A mistura de líquidos imiscíveis se dá quando a extração líquido-líquido torna-se um processo envolvendo sucessivas misturas e estágios de separação. Os líquidos são colocados em contato com um solvente que dissolverá seletivamente um dos componentes presentes na mistura. Agitação vigorosa causa a dispersão de uma fase em outra e, se o tamanho da gotícula é pequeno, uma alta área interfacial é criada na transferência de massa da interfase.

O mecanismo de mistura pode ser laminar ou turbulento. Denomina-se mistura laminar, quando o fluxo laminar é geralmente associado com líquidos de alta viscosidade (μ maior ou igual a 10 N.s/m^2). Neste caso, a mistura em líquidos é realizada por qualquer mecanismo que gradualmente reduza o tamanho ou escala do fluido e redistribua-o no fluido global. Se há inicialmente diferenças na concentração de um material solúvel, a uniformidade é gradualmente obtida. A influência da difusão molecular, que antes era o mecanismo mais importante, é reduzida. Na mistura turbulenta para líquidos de baixas viscosidades (μ menor ou igual a 10 mN.s/m^2), o fluxo global em vasos agitados com impelidores rotativos é turbulento. A difusão turbilhonar é mais rápida do que a difusão molecular e, conseqüentemente, a mistura turbulenta ocorre muito mais rapidamente do que a mistura laminar. A homogeneização molecular depende da difusão molecular, que ocorre

mais rapidamente em líquidos de baixa viscosidade. A mistura é mais rápida na região do impelidor, devido às altas taxas de agitação.

Gomide (1997) ressalta a importância do contato que os reagentes devem ter entre si para que haja as reações. Eles devem ser dispersos uns nos outros para que suas moléculas entrem em contato. A mistura classifica-se em três operações qualitativas:

- a) Homogeneização: o movimento é brando e visa uniformizar líquidos miscíveis para se conseguir algum grau de uniformidade no sistema ou acelerar o processo de difusão das moléculas;
- b) Mistura: o movimento é mais vigoroso e pretende uniformizar materiais miscíveis ou não;
- c) Agitação: a movimentação é intensa, atingindo diversas finalidades. Possui um fim múltiplo: uniformização, mistura, suspensão de um sólido num líquido, dispersão de um gás num líquido ou promoção da turbulência necessária para acelerar os processos de transferência de massa e calor.

Os meios mais empregados na operação de mistura são:

- a) Turbulência associada com o escoamento;
- b) Misturador de linha;
- c) Injeção de ar comprimido;
- d) Injeção através de bocais submersos;
- e) Mecânico.

O dispositivo mecânico é acionado por motor elétrico, turbina ou ar comprimido. Ele provoca a rotação do misturador propriamente dito, que pode ser dos seguintes tipos: turbina, hélice ou pás.

3.3.2. Equipamentos para a extração líquido-líquido.

Henley e Seader (1981) dividem os equipamentos para extração líquido-líquido em:

- a) Misturadores-decantadores (Mixer-settlers): varia desde um simples tanque com um agitador em que as fases são misturadas e seguem para um compartimento horizontal ou vertical onde ocorre a separação, até complexos sistemas em que a mistura é realizada em regime de jato, correntes simultâneas em bombas centrífugas ou mistura on-line por acessórios, injetores ou em orifícios ou bocais misturadores. O maior problema ocorre quando há emulsificação, ou seja, quando as gotículas formadas estão entre 1 e 1,5 μ m e não podem ser separadas neste processo, só coalescendo com outros métodos mais onerosos;
- b) Coluna spray: apesar do baixo custo o uso é limitado a um ou dois estágios sendo relativamente pouco utilizada. É realizada uma dispersão axial dentro da fase contínua;
- c) Coluna de pratos: a coluna utiliza diversos pratos perfurados, separados entre si, que promovem o contato entre as fases. É o tipo mais comum;
- d) Coluna com recheio: utiliza recheios que permitem maiores áreas de contato. Utilizada para colunas de pequenos diâmetros, provocando altas perdas de carga;
- e) Equipamento de gravidade mecanicamente induzida: utilizado para tensões interfaciais altas entre fases ou no caso de baixas diferenças de densidade entre estas;
- f) Extratores centrífugos: equipamento utilizado no caso de baixa diferença de densidade ou em situações de grande emulsificação.

Uma análise dos equipamentos de extração mais usuais é apresentada na Tabela 3.1, destacando-se suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3.1 - Equipamentos de extração líquido-líquido mais usuais.

Classe do Equipamento	Vantagens	Desvantagens
Misturadores-decantadores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bom contato; ✓ Larga faixa de taxa de fluxo; ✓ Alta eficiência; ✓ Operação em vários estágios; ✓ Extrapolação segura. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto custo elétrico; ✓ Alto investimento; ✓ Grande espaço para separação; ✓ Necessita utilizar bomba interestágio.
Equipamentos de contato em contra-corrente contínuo.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixo custo inicial; ✓ Baixo custo de operação; ✓ Simples construção. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vazão limitada para pequenas diferenças de densidade; ✓ Não opera com altas taxas de vazão; ✓ A eficiência diminui com o tempo; ✓ Difícil extrapolação.
Equipamentos de contato em co-corrente	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Boa dispersão; ✓ Custo razoável; ✓ Possibilidade de múltiplos estágios; ✓ Relativa facilidade de extrapolação. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vazões limitadas para pequenas diferenças de densidade; ✓ Não permite operar em sistemas emulsionados; ✓ Não permite operar com altas taxas de vazão.
Extratores centrífugos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Opera com baixa diferença de densidade entre fases. ✓ Baixo volume de controle; ✓ Pequenos tempos de operação; ✓ Pouco espaço requerido; ✓ Baixo inventário de solvente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto custo inicial; ✓ Alto custo operacional; ✓ Alto custo de manutenção; ✓ Limitado número de estágios em unidades simples.

Fonte: Henley e Seader, 1981.

3.3.3. Misturadores-decantadores (Mixer-settlers)

Godrey e Slater (1983) explicam que a faixa de aplicação do misturador-decantador é muito grande e o equipamento é útil em uma grande variedade de formas e tamanhos. O equipamento possui duas etapas predominantes: a etapa de mistura (onde é promovida agitação colocando em contato as duas fases líquidas) e a etapa de separação (etapa em que há a separação da fase extrato da fase refinado).

Foust et al (1982) relatam que os misturadores-decantadores utilizam agitadores mecânicos para dispersar as fases. Após a mistura íntima, as duas fases passam para um tanque de decantação onde podem separar-se pela ação da gravidade. Para separação em vários estágios usam-se misturadores-decantadores em série. O tamanho do tanque do

decantador é determinado pelas taxas de escoamento e pela taxa de decantação das duas fases. Os misturadores-decantadores são bastante utilizados devido sua alta eficiência (90 a 100%) quando a mistura é completa.

Hanson *apud* Paulo et al (1994) descrevem os misturadores-decantadores como contadores amplamente utilizados na indústria. Na sua forma mais simples, são constituídos de uma câmara de mistura e uma de decantação. Na câmara de mistura produz-se o contato da solução a tratar com a solução orgânica que contém o agente extratante. A dispersão assim produzida é repassada à câmara de decantação para se obter a separação de fases. Os misturadores-decantadores industriais têm geralmente o tamanho do seu decantador várias vezes maior que a câmara de mistura (Figura 3.1). Este fato tem incentivado a pesquisa de novos meios práticos para diminuir o tempo de coalescência da fase dispersa na câmara de decantação, o que se traduziria na conseqüente redução do tamanho do aparelho.

O processo de extração por solvente realizado comumente em misturadores-decantadores é uma técnica de separação em meio líquido envolvendo a transferência de massa através de uma interface. Esta transferência é função, entre outras variáveis, do tamanho das gotas dispersas, ou seja, da área interfacial entre as fases. Partículas de pequeno tamanho favorecem o aumento da taxa de transferência de massa, mas exigem por outro lado, um maior tempo de coalescência, conduzindo a um excessivo tamanho da câmara de decantação.

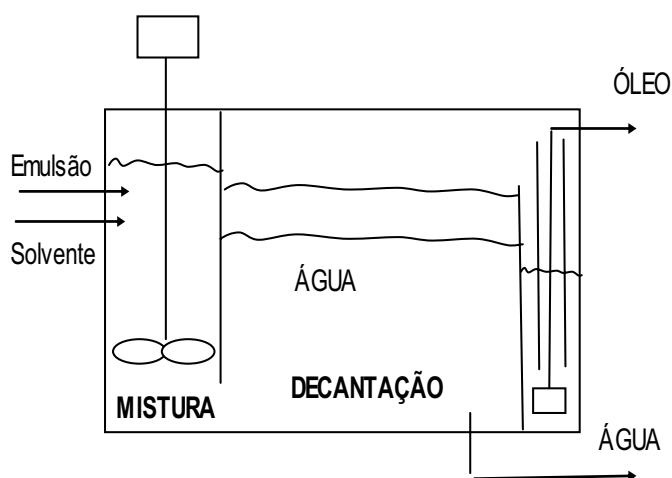


Figura 3.1 - Misturador-decantador convencional.

3.4. Misturador-Decantador à Inversão de Fases (MDIF)

3.4.1. Método da Inversão de Fases

Hadjiev e Aurelle (1995) observam que, para a separação de dispersões com gotículas maiores que 100 μm , decantadores são mais usados devido ao seu projeto simples. Para emulsões secundárias tendo um tamanho médio de gota de 20 μm ou menos, leito fibroso ou granular, coalescedor de cartucho ou dinâmico são os mais apropriados. O maior problema é achar equipamentos que trabalhem com diâmetro médio entre 20 e 100 μm , porque requerem grandes vasos e coalescedores que são caros e fortemente influenciados pela presença de matéria suspensa.

Hadjiev e Kuychoukov (1989) relatam que o processo de separação pode ser intensificado diminuindo-se o tempo de residência da fase dispersa no aparelho. Esta diminuição pode ser viabilizada, em se reduzindo a distância entre as gotículas dispersas e a interface. Os autores propõem assim o **método da inversão de fases** que, quando aplicado à decantadores, produz um decréscimo no tempo de deslocamento das gotículas que viajam para a interface orgânico-aquoso, onde coalescem.

Os autores complementam que a inversão de fases pode facilmente ser idealizada quando a fase contínua inicial é transformada em gotas que estão mais afastadas do que as gotículas na dispersão primária (Figura 3.2). Para este propósito a mistura de líquidos é forçada a passar por um prato perfurado ou outro tipo de acessório dispersor e são novamente formadas gotas de 4 a 6mm de diâmetro que são introduzidas no líquido orgânico original. Estas gotas milimétricas contêm as finas gotículas da dispersão inicial. Nesta situação tem-se uma dupla emulsão, qual seja a da gotícula orgânica no interior da gota aquosa e esta dentro do leito orgânico.

A separação de gotículas neste diâmetro não representa nenhum problema e as condições criadas permitem rápido deslocamento da fina gotícula para a interface da gota transportadora. De fato, a gota secundária também permite um transporte acelerado das

gotículas para a interface no equipamento de separação. Obviamente, este mecanismo requer que a velocidade de queda da gota transportadora no interior do leito orgânico seja menor do que a velocidade das pequenas gotículas movendo-se no interior da gota transportadora até a sua interface.

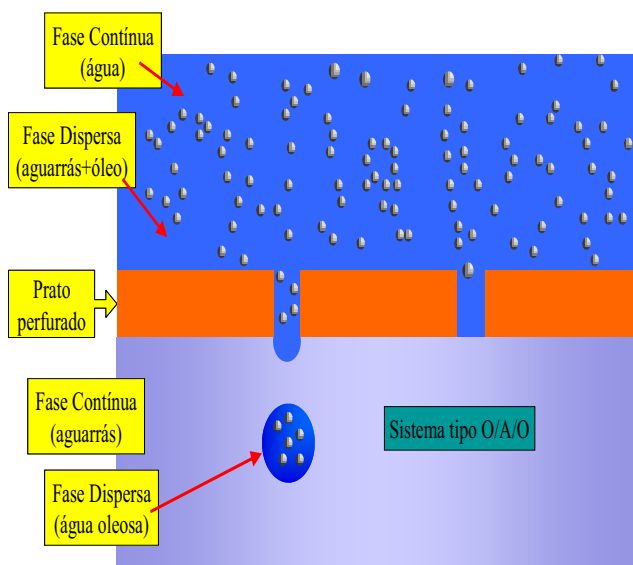


Figura 3.2. Inversão das fases no prato perfurado.

A Figura 3.3 mostra o princípio de funcionamento do Misturador-decantador à inversão de fases e o percurso decorrente da queda da gota transportadora no interior do leito orgânico. A Figura 3.4 apresenta as principais partes do equipamento MDIF, bem como os equipamentos utilizados para a realização dos testes em laboratório.

Paulo *et al* (1994) descrevem a seguir o funcionamento do Misturador-Decantador à Inversão de Fases (MDIF), conforme as Figuras 3.3 e 3.4. “A água oleosa e a aguarrás são bombeadas em co-corrente para o interior do reator da câmara de mistura localizado no topo do equipamento. Nesta etapa a água produzida é a fase contínua e a aguarrás oleosa é a fase dispersa. A dispersão primária (1) da aguarrás oleosa em água produzida, gerada na câmara de mistura, é forçada por ação da gravidade a passar através de um prato perfurado

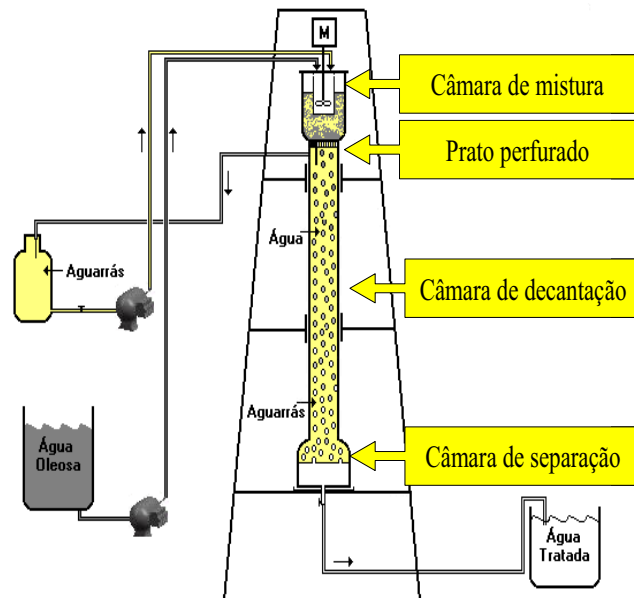


Figura 3.4. Partes componentes do misturador-decantador à inversão de fases.

Outro efeito que pode ser importante para o aumento da taxa de separação é a possibilidade de coalescência gotícula-gotícula no interior da gota transportadora, resultando em gotas relativamente maiores. Esta condição, de acordo com a lei de Stokes simplificada dada pela Equação (1), aumentaria a velocidade ascendente v_a das gotículas transportadas de diâmetro d , reduzindo o tempo de coalescência destas.

$$v_a = \frac{(\Delta\rho g d^2)}{18\mu_c} \quad (1)$$

onde,

v_a = velocidade ascensional da fase dispersa, m/s ;

d = diâmetro da gota da fase dispersa, m ;

g = constante gravitacional: $9,80 m/s^2$;

$\Delta\rho$ = diferença de massa específica entre as fases, kg/m^3 ;

μ_c = viscosidade dinâmica da fase contínua, $Pa.s = kg/m.s$.

Operando em condições de vazões específicas elevadas, *ao contrário dos aparelhos convencionais*, o misturador-decantador à inversão de fases apresenta melhor desempenho. Outra vantagem é a disposição vertical do aparelho, representando um ganho ao economizar espaço no *lay-out* de uma planta de operação. Como grande vantagem em relação aos contadores convencionais, Paulo *et al* (1994) ressaltam o fato do MDIF poder tratar até duas vezes mais a quantidade de solução que um aparelho de três vezes o seu volume, mantendo-se ou melhorando-se a eficiência de separação e extração. Os aparelhos mantêm ainda as características gerais dos mixer-settlers convencionais, quais sejam as grandes vazões efetivas, as facilidades de operação e manutenção e as partidas operacionais simples.

3.4.2. Trabalhos anteriores com o misturador-decantador à inversão de fases

Hadjiev & Kuychoukov (1989) apresentaram um estudo do sistema líquido querosene/água, onde se analisou a vazão efetiva e o diâmetro das partículas que influem na eficiência de extração. Utilizou-se a Equação (2) para o cálculo da eficiência de separação. Os autores concluíram que o aumento do teor do orgânico na fase dispersa primária acarreta um aumento na eficiência de separação.

$$E = \frac{(C_e - C_s)}{C_e} \times 100 \quad (2)$$

onde,

C_e e C_s são as concentrações de óleo em água na entrada e na saída do equipamento, respectivamente, dadas em mg/L.

Paulo *et al* (1993) analisaram a hidrodinâmica do misturador-decantador para emulsões de querosene em água, hexano em água e clorofórmio em água, usando uma solução padrão alcalina e LIX-54 como extratante. A fase orgânica utilizada foi de 60% de solução do extratante em querosene. Observou-se que a eficiência de separação aumenta com o decréscimo da viscosidade da fase contínua, bem como com o aumento da razão de

densidade entre a fase contínua e a fase dispersa (ρ_c/ρ_d). Quanto menor o diâmetro da gotícula formada no reator, menor a eficiência de separação, sendo que acima de 100 μm a eficiência é alta e, praticamente, constante. Os autores concluem que o aumento da vazão ocasiona um menor diâmetro das gotas transportadoras, implicando em aumento na eficiência de separação. Por outro lado, uma grande velocidade de agitação na câmara de mistura, reduz o diâmetro das gotículas transportadas, implicando em diminuição da eficiência de separação.

Paulo *et al* (1994) pesquisaram a extração de cobre, utilizando o novo misturador-decantador à inversão de fase, com o LIX-984 como agente extratante em querosene. Observou-se, especificamente, o desempenho do novo aparelho com relação a vazões específicas e a relação volumétrica de fases entre o orgânico/aquoso (O/A) mais elevadas. O sistema apresentou vantagens em relação aos contadores convencionais no tratamento de vazões específicas de até 40 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$. Os autores concluíram que razões O/A elevadas apresentam melhores resultados na eficiência de separação do equipamento.

Hadjiev e Aurelle (1995) estudaram o misturador-decantador à inversão de fases com e sem formação de leito denso. Produziram emulsões óleo/água para os pares TIOA/água, querosene/água e ciclohexano/água. Nos resultados obtidos verificou-se que em se aumentando a taxa de fluxo ou elevando-se a altura do leito orgânico, aumentava-se a eficiência de separação.

Paulo, Hadjiev e Gourdon (1996) utilizaram o agente extratante LIX-984 em querosene na extração do cobre, onde são avaliadas as concentrações do extratante, bem como o pH de equilíbrio. É realizada uma comparação entre o modelo químico de reação proposto pelo fabricante com outro obtido através de um método numérico alternativo. Os resultados mostraram que a extração é fortemente dependente do pH e o modelo obtido pelo método numérico mostrou-se tão útil como o modelo químico.

Chiavenato (1999), através do primeiro protótipo de laboratório do MDIF montado no Brasil, separou o óleo na forma emulsionada da água produzida na indústria do

petróleo, utilizando como solvente o orgânico aguarrás (mistura complexa de hidrocarbonetos). As amostras tratadas foram amostras reais provenientes da indústria de petróleo. Estas amostras eram oriundas dos campos de Xaréu e Atum (PXA-01), da Bacia do Ceará / Sub-bacia Mundaú. A água produzida continha teores de óleo variando entre 1.000 e 10.000 mg/L. A salinidade era de, aproximadamente, 73.000 mg/L. O objetivo final foi obter uma água de descarte com teor de óleos e graxas (TOG) de no máximo 20 mg/L, conforme a Resolução CONAMA nº 357.

Os resultados apresentaram uma tendência geral de aumento na eficiência de separação com o aumento da vazão efetiva total. Este aumento, segundo o autor, provoca uma maior velocidade de formação das gotas transportadoras através do dispersor tipo prato perfurado, resultando em gotas relativamente menores.

Fernandes Júnior (2002), utilizando um sistema com iguais características ao de Chiavenato (1999), estudou as seguintes variáveis: concentração de óleo em água na carga de entrada do equipamento, velocidade de agitação na câmara de mistura, relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A), altura da câmara de decantação e vazão efetiva total para o aparelho. O autor trabalhou com vazões específicas de até $47,87\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Obteve-se na realização dos testes uma eficiência de separação da ordem de 92,5%. As principais conclusões foram as seguintes:

- a) A altura de 1,0 m para o leito orgânico resultou em melhor rendimento na separação óleo/água em relação às demais alturas estudadas, tanto para situações de altas vazões e altas velocidades de agitação, como para baixas vazões e baixa velocidade de agitação;
- b) A relação O/A para a faixa de estudo, apresentou um melhor desempenho no ponto central do planejamento experimental que foi de 1/3. Esta relação foi sempre observada quando se obteve boa eficiência de separação em toda a faixa estudada;
- c) Mantendo-se fixos os valores de altura do leito em 1,00m e relação O/A em 1/3, observou-se que uma alta velocidade de agitação ($\geq 750\text{rpm}$), alta concentração (acima de 1.000 mg/L) e alta vazão ($\geq 80\text{L/h}$), conduziram aos melhores resultados de eficiência de separação;

d) A eficiência de separação obtida para avaliar o desempenho do MDIF, aplica-se a apenas um estágio de separação. Entretanto, pela característica do aparelho, podem-se implantar várias unidades em série com variações nas vazões totais, relação O/A, velocidade de agitação e altura que possibilitem a obtenção de uma maior eficiência global do sistema em estudo.

Moraes *et al.* (2002) realizaram um estudo com diferentes agentes extratantes usados na determinação de TOG por Espectrofotometria. O objetivo era avaliar a eficiência de separação entre as fases óleo bruto e água utilizando o Misturador-Decantador à Inversão de Fases no tratamento de águas produzidas. O método atualmente empregado baseia-se no padrão espectrofotométrico utilizado pela Petrobras, que emprega o clorofórmio como extratante, para “Determinação do Teor de Óleos e Graxas por Espectrofotometria de Absorção Molecular”. Os extratantes utilizados no estudo comparativo foram: hexano e aguarrás. Os autores concluíram que, em comparação ao método padrão por clorofórmio, o método que apresentou os melhores resultados foi o método de espectrofotometria com hexano, mostrando-se ser um método aplicável e também mais viável economicamente, à medida que o preço e a toxidez do hexano são menores quando comparados com o clorofórmio.

Hadjiev, Limousy e Sabiri (2004) estudaram o MDIF na condição de baixa velocidade nos terminais do prato perfurado. Os autores produziram emulsões O/A para o par querosene/água, heptano/água e clorofórmio/água. Observou-se, como já comprovado em trabalhos anteriores, que o aumento do leite orgânico aumenta a eficiência de separação. Pelos resultados obtidos, verificou-se que a eficiência de separação diminui com o aumento do diâmetro da gota transportadora e aumenta com o aumento do diâmetro da gota transportada.

Fernandes Jr. *et al* (2004) utilizaram variáveis de processo como velocidade de agitação, razão volumétrica orgânico/aquoso (O/A) e vazão efetiva para caracterizar o tamanho e a distribuição das gotas na câmara de decantação do Misturador-Decantador à Inversão de Fases – MDIF. O software utilizado na análise das gotas geradas foi o

Hidromess 1.40, que avalia os diferentes índices de refração entre duas fases líquidas presentes, quando estas passam através de um capilar introduzido na câmara de decantação. Os autores verificaram que a velocidade de agitação e a razão volumétrica orgânico/aquoso têm pouca significância para o aumento ou diminuição do diâmetro médio das gotas transportadoras quando medidos a uma mesma vazão. Porém, constataram que a vazão efetiva mostra-se com grande influência no tamanho e distribuição das gotas transportadoras geradas. Os diâmetros das gotas geradas pelo prato perfurado foram medidos. Estes valores variaram entre 1,6 e 2,7mm em função das condições operacionais.

Moraes (2005) utilizou o regime hidrodinâmico de “leito denso”. A utilização desta nova condição hidrodinâmica permite o aumento do tempo de residência da gota transportadora no interior da câmara de decantação (leito orgânico), além de tratar um maior volume de água produzida, visto que para se atingir esta condição é necessário se operar a altas vazões ($58,6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$). Os resultados, em se utilizando o regime de leito denso, mostram que se elevando a altura do leito de gotas não-coalescidas e/ou diminuindo a razão volumétrica orgânico/aquoso aumenta-se a eficiência de separação do aparelho.

3.4.3. Hidrodinâmica do MDIF

A hidrodinâmica do MDIF é bastante complexa. Tem-se um escoamento bifásico onde uma das fases se apresenta na forma de gotas. Diversos autores observam que se devem levar em consideração, além da operação em regime estacionário, os seguintes fatores relativos a cada parte constituinte do aparelho:

a) Reator da câmara de mistura: as fases orgânica e aquosa são admitidas em fluxo co-corrente. Considera-se que o regime de escoamento para o sistema estudado em laboratório e no campo é turbulento. Neste caso não há escorregamento entre fases, ou seja, as velocidades de deslocamento das fases orgânica e aquosa são consideradas iguais e não ocorre segregação entre fases. Fornece-se energia suficiente ao sistema, através do agitador, para que ocorra a total dispersão da fase orgânica na fase aquosa. Desta forma, a fase global

que sai do reator para a câmara de mistura, é composta da fase aquosa (transportadora) tendo no seu interior a fase orgânica (transportada). A fase orgânica é uma mistura homogênea do extratante orgânico e do petróleo que inicialmente encontrava-se disperso na fase aquosa. As propriedades físico-químicas de fluxo global levam em consideração as propriedades do aquoso e do orgânico em seu interior. A velocidade de escoamento na saída do reator é uma razão entre a vazão total de líquidos que chegam ao reator (fase aquosa somada à fase orgânica) e a área total de passagem no reator;

b) Prato perfurado: a fase contínua é o extratante orgânico puro utilizado para preencher a coluna de decantação, o prato perfurado e parte da câmara de mistura acima do prato. A fase dispersa é a fase aquosa (gota transportadora) tendo no seu interior a fase orgânica (gotícula transportada). Este orgânico puro satura-se em óleo e gradualmente varia suas propriedades físico-químicas. Observa-se que o fluxo existente é o da fase aquosa (gota transportadora) no sentido descendente. O movimento da fase contínua é puramente difusional e é desprezado pelos autores. A velocidade de escoamento é proporcional ao fluxo global descendente e à área total de passagem dos furos;

c) Câmara de decantação: foi observado por diversos autores que esta câmara comporta-se como uma coluna à pulverização no que concerne ao comportamento hidrodinâmico. A fase contínua é o extratante orgânico puro utilizado para preencher toda a coluna de decantação. A fase dispersa são as gotas do aquoso formadas no prato perfurado (gotas transportadoras) tendo no seu interior as gotículas da fase orgânica (gotículas transportadas), sistema este produzido anteriormente no reator da câmara de mistura e mantido no prato perfurado. Observa-se que existe uma dupla emulsão (orgânico/água/orgânico). Nota-se que existe um sistema de fluxo em contra-corrente entre as gotas transportadoras e o meio contínuo da câmara de decantação. A velocidade de escoamento da gota transportadora em direção à base da câmara de decantação é, portanto, relativa. Esta é função da diferença de velocidade da gota transportadora (componente gravitacional) no sentido descendente e da velocidade da fase contínua orgânica em sentido ascendente até a saída desta pelo topo da câmara de mistura.

Verifica-se que os fatores mais significantes para a eficiência da separação que ocorre no MDIF são:

- a) Diâmetro da gotícula do extratante orgânico dispersa na fase aquosa, na etapa de agitação que ocorre no interior do reator da câmara de mistura;
- b) Diâmetro da gota transportadora do aquoso gerada na passagem pelo prato perfurado;
- c) Velocidade relativa de escoamento da gota transportadora descendente e da fase contínua orgânica ascendente no interior da câmara de decantação.

3.4.3.1. Hidrodinâmica da Câmara de Mistura

A dispersão líquido/líquido formada em uma câmara agitada é caracterizada por dois processos dinâmicos: o fracionamento das gotas e a coalescência. A distribuição do tamanho das gotas depende das condições de agitação e das propriedades físicas do sistema. O fracionamento das gotas ocorre em qualquer região de alta turbulência, perto das lâminas do agitador ou como resultado da turbulenta velocidade e variações de pressão ao longo da superfície da gota simples. Em geral o fluxo na câmara agitada está longe de ser homogêneo.

O fluxo pode ser dividido em duas regiões: a região da turbina e a região de circulação. O fracionamento das gotas é observado perto da turbina e a coalescência das gotas usualmente ocorre longe da turbina, de acordo com Chatzi, Gavrielides e Kiparissides, 1989. Pode-se alcançar o equilíbrio dinâmico entre os processos de fracionamento e coalescência de gotas, mantendo-se a agitação constante.

As gotas geradas na câmara de mistura, através de agitação, devem possuir um tamanho ótimo para uma efetiva transferência de massa. Sabe-se que pequenas gotas produzem grande área interfacial, favorecendo assim a transferência de massa. Entretanto,

gotas muito pequenas, requerem um tempo maior de coalescência, conduzindo a um aumento no tamanho do decantador.

O tamanho das gotas vai depender principalmente das condições de agitação. A Equação (3) de Nagata (1950) leva em consideração um sistema agitado munido de uma turbina tipo Rushton, contendo quatro lâminas e diâmetro equivalente a 1/3 do diâmetro da base da câmara de mistura. A velocidade crítica funcional do agitador (N_{CR}) representa a velocidade mínima necessária para dispersar completamente um líquido em outro líquido imiscível.

$$N_{CR} = KD_r^{-2/3} \left[\frac{\mu_c}{\rho_c} \right]^{1/9} \left[\frac{\rho_c - \rho_d}{\rho_c} \right]^{0,26} \quad (3)$$

Onde:

Condição para turbina tipo Rushton: diâmetro do impelidor $d=0,4D$.

N_{cr} = Agitação mínima da dispersão de uma fase em outra (rpm);

K = constante de posição do agitador (750 para agitação no centro);

D = diâmetro interno do vaso agitado (m);

μ_c = viscosidade da fase contínua (kg/m.s);

ρ_c = densidade da fase contínua (Kg/m³);

ρ_d = densidade da fase dispersa (Kg/m³).

Observa-se que a velocidade de dispersão não depende da tensão interfacial e nem da viscosidade da fase dispersa. Para cada velocidade de rotação e dimensão de agitador têm-se vários turbilhões com uma quantidade de energia cinética de turbulência fixa. O Princípio da Cascata de Energia (Roustan, 1993) refere-se à transferência progressiva de energia das “estruturas mais grossas para as mais finas”.

Em câmara agitada dotada de defletores o escoamento é dito turbulento se o número de Reynolds (Re_{agit}) for superior a 10^4 . A equação (4) apresenta este cálculo para a obtenção do regime em uma câmara agitada.

$$\text{Re}_{\text{agit}} = \frac{N d^2 \rho_c}{\mu_c} \quad (4)$$

Re_{agit} = número de Reynolds para o agitador.

N = velocidade rotacional do agitador, rps;

d = diâmetro do impelidor, m;

μ_c = viscosidade da fase contínua, kg/m.s;

ρ_c = densidade da fase contínua, kg/m³;

O equilíbrio dinâmico resulta de uma competição entre os efeitos de fracionamento e coalescência de gotas. Desta forma, o diâmetro médio de Sauter, d_{32} (Equação 5) caracteriza as gotas da dispersão primária, formadas pelo agitador, ou seja, para o sistema estudado, refere-se ao diâmetro médio das gotas de orgânico carregado em óleo (Coulaloglou e Tavlarides, 1976).

$$\frac{d_{32}}{d} = a_1 (1 + a_2 \phi_K) (We_T)^{-0,6} \quad (5)$$

Os termos $a_1 = 0,049$ e $a_2 = 18,64$ são constantes relativas às características do sistema líquido/líquido estudado e foram obtidos por Paulo (1996) para o sistema querosene/água (Tabela 3.2), sistema este similar ao dos testes realizados com o MDIF. O termo $(1 + a_2 \phi_K)$ reflete a contribuição da retenção em fase dispersa na redução do nível de turbulência gerada pela agitação. Assim, quanto maior for este termo, menos tendência terão as gotas de se romperem. Pode-se considerar este termo, como sendo um fator corretivo devido à tendência a coalescência de gotas da fase dispersa. Ressalte-se que a retenção em fase dispersa, ϕ_K , que aparece na expressão acima, é definida como a razão entre o volume da fase orgânica e o volume da fase líquida (fase orgânica mais fase aquosa). O diâmetro do impelidor é representado por d .

O termo referente ao número de Weber (We_T) para a turbina que aparece na correlação (5) foi calculado pela Equação (6). Este termo representa a relação entre as forças de inércia e as forças de rigidez, representadas essencialmente pela tensão interfacial.

$$We_T = \frac{\rho_c N^2 d^3}{\sigma} \quad (6)$$

We_T = número de Weber para a turbina.

N = velocidade rotacional do agitador (rps);

d = diâmetro do impelidor (m);

σ = Tensão interfacial (N/m = kg/s²);

ρ_c = densidade da fase contínua (kg/m³);

Tabela 3.2: Propriedades físico-químicas do sistema querosene/água.

PRODUTO	Densidade(ρ) x 10 ³ kg/m ³	Viscosidade (μ) x 10 ⁻³ Pa.s	Tensão interfacial (γ) x 10 ⁻³ N/m
Água	0,979	1,19	
Querosene	0,779	1,58	38,1

Fonte: Paulo, 1996.

3.4.3.2. Hidrodinâmica do Prato Perfurado

Segundo Perrut (1972), a natureza das gotas formadas em um distribuidor (por exemplo, um prato perfurado) quando se faz passar um líquido pelo seu interior, depende principalmente do tamanho e da geometria do furo e da molhabilidade relativa do distribuidor pela fase dispersa.

O tamanho da gota formada é função da fase que molha preferencialmente os furos do prato perfurado. Desta forma, podem-se formar gotas na qual a fase dispersa molha preferencialmente a superfície do distribuidor ou esta é molhada pela fase contínua.

Capítulo 3: Aspectos Teóricos e Revisão da Literatura

Gotas grandes, não esféricas e sem nenhuma reprodutibilidade são formadas quando a fase dispersa molha preferencialmente o distribuidor. Este efeito é maior quanto menor for a velocidade através do distribuidor.

Em função da velocidade de passagem pelos furos do distribuidor, podem-se estabelecer dois regimes de formação para sistemas em que a fase contínua molha os furos do distribuidor: o regime de formação gota-a-gota ou o de formação por quebra de um jato. Os dois mecanismos dependem das propriedades físico-químicas do sistema, tais como, diferença de densidade entre as fases, densidade da fase dispersa, viscosidade da fase contínua e tensão interfacial.

Gotas esféricas e com melhor reprodutibilidade são obtidas quando a fase contínua molha o distribuidor. Se a velocidade de passagem da fase dispersa é relativamente pequena, a gota se forma suavemente até o momento em que o empuxo supera a tensão interfacial fazendo com que a gota se solte do distribuidor. Tem-se o regime de formação gota-a-gota.

O aumento da velocidade gera gotas menores e mais uniformes, aumentando a área interfacial entre os fluidos, facilitando assim a transferência de massa. Com este incremento de velocidade, pode-se alcançar o chamado regime de jato, onde um verdadeiro jato da fase dispersa se forma quando da passagem desta através do prato perfurado. As gotas são formadas pela desintegração deste jato. Neste regime as gotas formadas são muito pequenas e não há uniformidade nos seus tamanhos (Perrut, 1972 e Dalingeros, 1986).

Muller (1976) sugere que para velocidades do fluido em um orifício abaixo de 0,33m/s tem-se o regime gota-a-gota e, para velocidades superiores, o regime por quebra de jato.

Ruff et al (1978) propõem a Equação (7) para determinar a velocidade de início de formação do jato para sistemas líquido/líquido.

$$u_J = \left[\frac{2\sigma}{\rho_d d} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

u_J = velocidade de início de formação do jato pelo orifício, m/s.

d = diâmetro do furo no distribuidor, m;

σ = Tensão interfacial, N/m ou kg/s^2 ;

ρ_d = densidade da fase dispersa (kg/m^3);

Para distribuidores com vários furos, muitos autores propuseram correlações para o diâmetro médio de Sauter de uma gota (D_{32}).

Scheele e Meister (1968) apresentam a Equação (8) para o cálculo do diâmetro médio de Sauter (D_{32}) da gota gerada no orifício dispersor quando o sistema está no início do regime de jato.

$$u_J = \sqrt{\left[\frac{3\sigma}{\rho_d d} \right] \left[1 - \frac{d}{D_{32}} \right]} \quad (8)$$

O diâmetro médio das gotas produzidas no prato distribuidor (diâmetro médio de Sauter, D_{32}) também foi estimado pela correlação de Kumar e Hartland (1982), dada pela Equação (9):

$$\frac{D_{32}}{d} = 1,59(We)^{-0,07} E\ddot{o}^{-0,28} \quad (9)$$

Onde:

$E\ddot{o}$ = número de Eötvös;

We = número de Weber;

d = diâmetro do furo no distribuidor, m.

A Equação (9) é válida para $0 < We < 2,0$. O número de Weber (We) para o fluxo do fluido em um orifício é calculado pela equação (10):

$$We = \frac{u_N^2 \Delta \rho d}{\sigma} \quad (10)$$

A velocidade da gota em um orifício do distribuidor (u_N) é determinada pela equação (11):

$$u_N = \left[\frac{4Q}{N\pi d^2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Onde:

Q = vazão total pelos furos, m³/s;

N = número total de furos do distribuidor.

d = diâmetro dos furos, m.

O número d'Eötvos é calculado pela Equação (12), segundo De Chazal, 1971.

$$Eö = \frac{\Delta \rho g d^2}{\sigma} \quad (12)$$

3.4.3.3. Hidrodinâmica da Câmara de Decantação

A câmara de decantação do MDIF se assemelha a uma coluna a pulverização (*spray*) no que concerne ao funcionamento hidrodinâmico. A formação do leito neste equipamento e as condições que permeiam esta formação são informações que proporcionam um melhor entendimento do MDIF.

Na câmara de decantação funciona um sistema de dupla emulsão. A gota do aquoso gerada no prato perfurado é a fase contínua do sistema gotícula transportada/gota transportadora (orgânico saturado em óleo/água produzida). Esta gota transportadora ao se deslocar do prato perfurado pelo interior do leite orgânico torna-se a fase dispersa, enquanto que o leite orgânico, preenchido totalmente pelo extratante puro, se constitui na fase contínua. Neste segundo caso temos uma emulsão gota transportadora/leite orgânico (água produzida/extratante orgânico).

O comportamento hidrodinâmico da câmara de decantação está normalmente relacionado com três velocidades características do sistema:

- a) U_d , velocidade de deslocamento das gotas transportadoras (fase dispersa);
- b) U_r , velocidade resultante de deslocamento das gotas transportadoras em relação à fase contínua;
- c) U_c , velocidade de deslocamento da fase contínua (leite orgânico).

O cálculo da velocidade resultante de deslocamento das gotas transportadoras em direção à base da câmara de decantação é dado pela Equação (13) abaixo.

$$U_r = U_d - U_c \quad (13)$$

A Equação (1) de Stokes simplificada é apresentada para o cálculo da velocidade de deslocamento U_d de uma gota transportadora em meio orgânico estagnado. Nesta condição supõe-se que não existe fluxo ascendente do meio orgânico na câmara de decantação.

A velocidade ascendente da fase orgânica (U_c) é dada pela Equação (14) e considera o deslocamento desta fase sem a presença das gotas do aquoso se deslocando no seu interior.

$$U_c = \frac{Q_o}{A} \quad (14)$$

Q_o = Vazão da fase orgânica para o equipamento: m^3/s ;

A = área da seção transversal da câmara de decantação: m^2 .

A Figura 3.5 representa o modelo simples no qual a gota do aquoso gerada no prato perfurado, com diâmetro médio de Sauter, D_{32} , transporta em seu interior a gotícula do extratante orgânico saturado em óleo, com diâmetro médio de Sauter, d_{32} . Considera-se neste modelo a condição mais desfavorável para a coalescência da gota do orgânico, qual seja a parte inferior da gota do aquoso, onde esta deverá se deslocar por todo o diâmetro da gota transportadora (D_{32}) e atingir a parte superior desta, rompendo o filme interfacial e se homogeneizando no leito do extratante orgânico. Supõem-se neste modelo que as gotas do aquoso e do orgânico desenvolvem apenas movimentos translacionais, não se considerando os componentes radiais e movimentos vibracionais, induzidos pelas linhas de corrente do fluxo de leito orgânico ascendente, conforme visto na Figura 3.6.

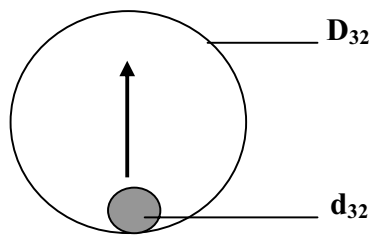


Figura 3.5. Modelo translacional da gota do orgânico no interior da gota do aquoso.

(Fonte: Aurelle et al., 1991).

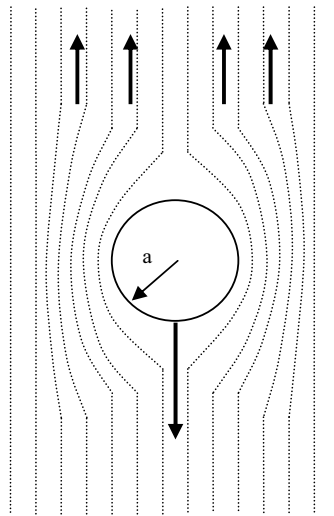


Figura 3.6: Escoamento da gota transportadora em leito orgânico

O tempo de residência (t_R) que a gota transportadora leva para se deslocar desde a sua formação no prato perfurado, através do leito orgânico, até a interface principal de separação, pode ser avaliado pela equação (15), considerando que a gota seja única, não oscile e nem esteja animada com qualquer movimento de rotação:

$$t_R = \frac{H}{U_r} \quad (15)$$

O tempo de residência (t_d) que a gotícula transportada (orgânico) leva para se deslocar desde a parte mais baixa da gota transportadora até a parte mais alta é dado pela Equação (16). Nesta situação a fase contínua é a água de formação e a fase dispersa é a fase orgânica. Cada gota de água de formação se comporta como se fosse um micro-decantador.

$$t_d = \frac{D_{32}}{U_a} \quad (16)$$

A velocidade ascendente da gotícula (U_a) é dada pela Equação (1) de Stokes simplificada, utilizando a gota do aquoso como a fase contínua e a gotícula transportada como a fase dispersa.

Aurette, Hadjiev, Brounhonesque, et al. (1991) calcularam a eficiência de separação com o método da inversão de fases através do modelo teórico translacional. Segundo os autores a condição de separação total (100% de eficiência) deveria ocorrer quando $t_d < t_R$. Nestas circunstâncias, toda gotícula de orgânico dispersa na gota transportadora seria extraída do interior desta e a eficiência de separação tenderia a 100%. Este situação não se verificou na prática, ou seja, o modelo translacional não se mostrou indicado para descrever o fenômeno físico.

Autores como Damak (1992) relatam que visualizaram, com auxílio de câmara de vídeo de alta velocidade, movimentos vibracionais e rotacionais da gotícula transportada no interior da gota transportadora. Este fato revela a grande limitação do modelo translacional e concorre para o fato de que o t_R , calculado pelo modelo, resulte em valores bem maiores que o t_d . Os movimentos vibracionais e rotacionais da gotícula contribuem para o aumento do tempo de residência t_d desta no interior da gota transportadora. Desta forma o tempo de residência da gota transportadora t_R é menor que o tempo de residência da gotícula transportada t_d , implicando em permanência desta na água tratada, reduzindo a eficiência de separação do equipamento.

Paulo (1996), numa tentativa de descrever em parte estes movimentos rotacionais, comparou a trajetória de gotículas transportadas animadas de movimentos rotacionais (modelo de Hadamard) com a trajetória seguida quando estas gotículas têm movimento de Stokes (translação) além de rotacionais. O autor conclui que para um diâmetro de gota transportadora fixo e da ordem de 3,2 mm, e gotas transportadas da ordem de 400 μ m, estas parecem sofrer influência do regime de Hadamard. Neste caso, tem-se um aumento de t_d , possivelmente porque a velocidade de circulação se opõe de certa forma à velocidade de decantação.

A retenção da fase aquosa dentro do decantador do MDIF, definida na condição limite de inundação (β_e) é calculada pela equação (17). Nesta condição de operação, a coluna passa a acumular fluido, sendo a velocidade de saída de líquidos menor que a velocidade de retenção no interior desta. O regime de operação da coluna não é mais estacionário.

$$\left[\frac{Q_d}{Q_c} \right] = \frac{2\beta_e^2}{(1 - \beta_e)(1 - 2\beta_e)} \quad (17)$$

Perrut e Loutaty (1972) prescrevem um valor máximo de 0,5 para a retenção em uma coluna de pulverização antes da condição de inundação.

3.5. Extrapolação de escala (*Scale-up*)

Bisio e Kabel (1985) definem a extrapolação de escala (*scale-up*) como um processo ou grupo de atividades que se operacionaliza desde o cálculo, o estudo até as demonstrações para uma bem sucedida operação industrial. O *scale-up* é inerente a toda atividade industrial.

A extrapolação de escala inclui muitas faces da atividade industrial. Neste sentido ela inclui várias atividades como marketing, projeto de produto, teste de produto, projeto de planta e construção de planta. Os autores revelam que, quando um novo processo químico ou uma mudança em alguma parte do processo se desloca do laboratório para uma operação de manufatura comercial, problemas não esperados são encontrados. O problema pode ser de natureza física, química ou envolvendo algum dos aspectos de ambos.

A bem sucedida partida e operação de uma unidade em tamanho comercial para quem opera e projeta é, em parte, decorrente de experiências e testes para uma menor escala de operação. A razão de *scale-up* é definida como a razão entre o tamanho da

unidade comercial e o melhor desempenho da unidade em menor escala em que os dados são obtidos, conforme Equação (18),

$$\text{Razão de scale up} = \frac{\text{taxa de produção comercial}}{\text{taxa de produção em unidade piloto}} \quad (18)$$

A Tabela 3.3 apresenta os valores normalmente encontrados quando se realiza o scale-up de equipamentos de laboratório para unidades de plantas piloto, da ordem de 100 a 500.

Tabela 3.3 – Valores da razão de *scale-up*.

Sistema	Escala de operação(kg/h)		Razão de <i>scale-up</i>	
	Laboratório	Planta piloto	Laboratório para planta piloto	Planta piloto para comercial
Reagentes líquidos e gasosos, produtos líquidos não viscosos	0,01 a 0,20	1 a 30	100 a 500	100 a 500

Fonte: Bisio e Kabel, 1985.

Peters & Timmerhaus (1991) enfatizam que o desenvolvimento de um projeto de processos envolve diferentes passos.

O primeiro passo deve ser a concepção da idéia básica. A próxima etapa é a fase de pesquisa-processo, experimentos em escala de laboratório e produção de análises amostrais do produto final. Quando as variáveis do processo são estabilizadas, o projeto é enviado para a **fase de desenvolvimento**. Nesta fase, uma *planta-piloto* ou uma planta de desenvolvimento comercial deve ser construída. **Uma planta-piloto é uma réplica em escala menor de uma planta comercial em escala total**, onde uma planta de desenvolvimento comercial é usualmente feita de excedente de partes de equipamentos que estão disponíveis.

A Tabela 3.4 apresenta uma análise de importantes fatores para extrapolação de diferentes tipos de equipamentos. Ela mostra a mais importante variável que caracteriza o

tamanho ou capacidade do equipamento e a máxima razão de extrapolação de escala para estas variáveis.

Tabela 3.4. Fatores para extrapolação de escala e projeto.

Tipo do equipamento	Variáveis mais importantes para o projeto operacional.	Variáveis importantes caracterizando tamanho ou capacidade	Máxima razão de extrapolação baseada na indicação da variável característica	Fator de segurança aproximado (%)
Misturadores	Mecanismo de operação; Geometria do sistema	Taxa de fluxo; Entrada de energia	>100:1 20:1	20
Separadores	Velocidade de sedimentação	Volume; Tempo de residência	> 100:1	15
Coluna Spray	Solubilidade do gás	Taxa de fluxo; Entrada de energia	10:1	20

Fonte: Bisio e Kabel, 1985.

3.5.1. Extrapolação de escala de misturadores

A extrapolação permite reproduzir em escala industrial os resultados obtidos sobre uma operação física ou química efetuada na escala de laboratório ou piloto.

Bertrand (1992) afirma que, quando as relações entre um ou mais parâmetros são as mesmas para as duas escalas diferentes (escala de laboratório e escala industrial), tem-se o *princípio da similaridade*. São cinco os principais tipos de similaridade: geométrica, cinemática, dinâmica, química e térmica.

A similaridade geométrica determina que as relações entre as dimensões geométricas sejam as mesmas para as duas escalas, a escala piloto e a industrial. A similaridade geométrica é condição imperativa para os outros tipos de similaridade.

O autor enfatiza que os pontos geometricamente importantes são os seguintes:

- a) A geometria do impelidor do agitador;
- b) A dimensão relativa entre o diâmetro do impelidor e o do reator ($d/D = \text{constante}$);
- c) A forma do reator e a relação entre sua altura e seu diâmetro ($H/D = \text{constante}$);
- d) Os acessórios internos do reator (defletores, serpentinas);
- e) A posição do impelidor em relação à base do reator ($H_a/D = \text{constante}$).

No início da extrapolação deve-se eleger uma propriedade invariante, sendo recomendado para a similaridade geométrica que se opte por uma das seguintes propriedades: número de Reynolds, número de Froude, número de Weber, velocidade periférica (V_p) ou razão da potência por unidade de volume (P/V).

3.5.2. A Natureza do projeto

Coulson e Richardson (1989) definem o projeto como uma atividade criativa. Ele representa a síntese, a reunião de idéias para atingir um objetivo desejado. O projetista irá criar um projeto para um artigo, ou um processo. No projeto de um processo químico existe a necessidade pública do produto, a oportunidade comercial. Alguns aspectos devem ser levados em consideração. Os autores citam alguns deles:

- a) Para conceber um projeto deve-se reunir todos os fatores relevantes e os dados necessários a sua consecução. Estes dados incluirão informações sobre os processos possíveis, sobre o desempenho do equipamento e valores das propriedades físicas;
- b) Conhecimento das normas nacionais que constituem fontes de métodos e dados de projeto ao mesmo tempo em que atuam como limitações ao mesmo;
- c) Os condicionantes do projeto, especialmente os de origem externa que devem ser identificados na fase inicial do processo;

O projeto de engenharia pode dividir-se em três grupos, conforme o grau de novidade em causa:

- a) Modificações e acréscimos a uma planta existente;

- b) Nova capacidade de produção, repetindo projetos antigos, somente com pequenas modificações de projeto;
- c) ***Processos novos, desenvolvidos a partir de investigação laboratorial, passando por instalação piloto até o processo industrial:*** neste caso, a estratégia é dividida em duas etapas. 1) a primeira etapa de um novo projeto será esboçar um diagrama de blocos grosseiro, que represente as principais etapas no processo e registrar a função principal (objetivo) e os principais problemas de cada etapa. 2) depois, a experiência deve indicar quais os tipos de operações unitárias e de equipamentos devem ser considerados.

3.5.3. Códigos, Normas e Fatores de Segurança.

Segundo Coulson e Richardson (1989) as normas abrangem:

- a) Materiais, propriedades e composições;
- b) Método de ensaio do funcionamento, das composições e da qualidade;
- c) Tamanhos recomendados, por exemplo, tubos, placas e perfis;
- d) Métodos de projeto, inspeção e fabricação;
- e) Normas práticas para funcionamento e segurança da instalação;

Carvalho (1998) relata que as normas e códigos de projeto foram estabelecidos não só com a finalidade de padronizar e simplificar o cálculo e projeto dos vasos de pressão, mas principalmente para garantir condições mínimas de segurança para a sua operação. A prática tem comprovado que a observância dessas normas torna muito baixa a probabilidade de ocorrência de acidentes graves.

Um código ou norma de projeto representa um conjunto coerente de premissas que são características do documento, relacionando critérios de cálculo, coeficientes de segurança, padronização e especificação de materiais, detalhes de fabricação e inspeção, extensão mínima dos exames não destrutivos e critérios de aceitação a serem adotados para os materiais e juntas soldadas. Estes itens não devem ser desvinculados, ou seja, devem ser aplicados em todo o projeto.

O código brasileiro foi elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A norma relacionada com vasos de pressão é a NB-109.

3.5.4. Materiais de Construção

Carvalho (1998) define como “Vaso de Pressão” todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidades, não sujeitos a chama, que contenham qualquer fluido, projetado para resistir com segurança uma pressão interna superior a $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ ou inferior à pressão atmosférica, ou submetidos à pressão externa.

Em refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas os vasos de pressão constituem um conjunto importante de equipamentos que abrangem os mais variados usos.

A construção de um vaso de pressão envolve uma série de cuidados especiais relacionados com o seu projeto, fabricação, montagem, inspeção e testes. As falhas de operação em um vaso de pressão podem provocar além da perda de produto e parada do processo, a perda de vidas humanas. Assim sendo o vaso de pressão é considerado um equipamento de grande risco.

3.6. Planejamento experimental e otimização de experimentos

Werkema e Aguiar (1996) definem Estatística como a ciência que lida com a coleta, o processamento e a disposição de dados (informação), atuando como ferramenta fundamental na solução de problemas.

Um experimento é um procedimento no qual alterações propositas são feitas nas variáveis de entrada de um processo, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões destas alterações.

A formulação do problema é o início da análise de um processo a otimizar. Se esta formulação for inadequada com a concepção prática ou for irreal, o resultado da aplicação dos processos numéricos de otimização podem ser irrelevantes. Tem-se a impressão que se atingiu o ótimo quando apenas pesquisou-se a melhor configuração de uma concepção errada. O ideal prático da otimização aplicada deve corresponder aos seguintes objetivos:

- a) Encontrar uma concepção física ou operacional que seja a mais adequada para resolver o problema em questão;
- b) Definir os limites físicos para a formulação escolhida, representando fielmente a situação real;
- c) Definir o modelo matemático adequado e otimizá-lo, realizando uma análise de sensibilidade dos resultados.

Barros Neto; Scarmínio; Bruns (1995) afirmam que otimizar um sistema significa descobrir quais são os valores das variáveis envolvidas que produzem a melhor resposta. O procedimento correto para se obter o melhor rendimento dos valores das variáveis, **consiste em fazer variar, ao contrário do que se poderia esperar, todas as variáveis ao mesmo tempo**. A razão para isso é que as variáveis podem se influenciar mutuamente e o valor ideal para uma delas pode depender do valor da outra. Este comportamento é chamado de **interação entre variáveis**, fenômeno que ocorre freqüentemente, pois raras são as situações em que duas ou mais variáveis atuam de forma independente.

O objetivo esperado é que, utilizando-se planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, os pesquisadores possam extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação procurada. A pergunta que sempre ocorre é de como é possível variar tudo ao mesmo tempo?

A primeira coisa a fazer no planejamento de um experimento é determinar para o sistema que se deseja estudar, quais são os fatores e as respostas de interesse, conforme Figura 3.7.

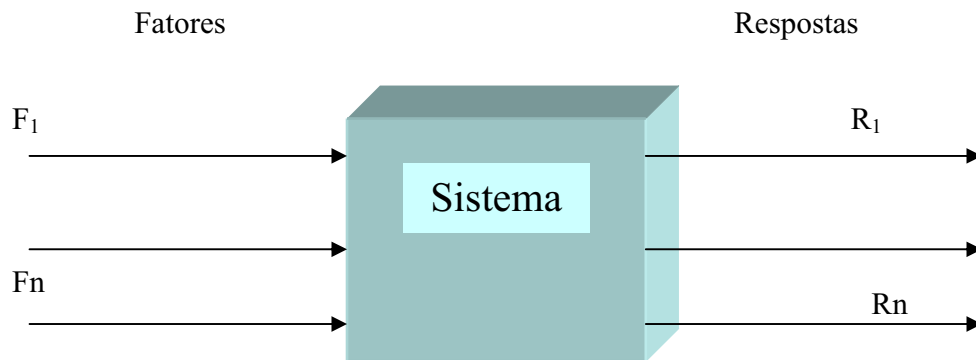


Figura 3.7. Diagrama de blocos interligando os fatores às respostas.

(Fonte: Barros neto; Scarmínio; Bruns, 1995).

Werkema e Aguiar (1996) enfatizam que, para se realizar um **experimento de forma eficiente**, deve ser utilizada uma abordagem científica para o seu planejamento. Esta abordagem é identificada por meio do termo **planejamento estatístico de experimentos**, que se refere ao procedimento de planejar um experimento de forma que dados apropriados sejam coletados em tempo e custo mínimos. A análise destes dados por meio de técnicas estatísticas resultará em conclusões confiáveis

Além dos princípios básicos do planejamento de experimentos procura-se eliminar os erros sistemáticos, estes são erros que afetam o resultado sempre na mesma direção, seja para mais ou para menos. Este é o caso por exemplo, de uma balança descalibrada.

3.6.1. Planejamento fatorial em dois níveis

Box; Hunter; Hunter (1978) explicam que o planejamento fatorial de dois níveis é de grande utilidade em investigações preliminares, quando se deseja saber se determinados fatores têm ou não influência sobre a resposta.

Um planejamento fatorial requer a execução de experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Havendo k fatores, isto é, k variáveis

controladas pelo experimentador, o planejamento de dois níveis irá requerer a realização de $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ ensaios diferentes, sendo por isto chamado de planejamento fatorial 2^k .

Nos experimentos fatoriais 2^k , os níveis dos fatores podem ser qualitativos ou quantitativos. Dois diferentes operadores (A e B) e os níveis codificados como “alto” e “baixo” de um fator, são exemplos de níveis qualitativos. Já dois diferentes valores da temperatura de uma coluna (20 e 50°C) e da velocidade de rotação de um agitador (1.000 e 2.000rpm) são exemplos de níveis quantitativos.

Barros Neto; Scarmínio; Bruns (1995) e Werkema e Aguiar (1996) explicam que, quando o efeito de uma variável depende do nível de outra, diz-se que estas variáveis interagem e pode-se calcular o efeito de interação entre elas. A existência da interação torna incorreta a análise isolada do efeito de um único fator. Se o comportamento de um fator não é o mesmo nos dois níveis do outro fator, diz-se que existe **interação** entre os fatores. O efeito da interação entre dois fatores é definido como a metade da diferença entre os efeitos de um fator nos dois níveis do outro fator. Quando a interação é muito significativa, os efeitos principais correspondentes apresentam pouco sentido prático.

No modelo estatístico a **repetição** dos experimentos permite estimar o **erro experimental**, sendo que a importância de uma interação para um modelo deve decrescer com o número de fatores envolvidos na sua definição.

Na construção do planejamento, atribui-se para o menor nível o valor codificado [-1] e para o maior nível o valor codificado [+1]. A Equação (19) é utilizada para se obter os valores codificados das variáveis, X_i apresentados na Tabela 3.5.

$$X_i = \frac{V_i - V_M}{(V_B - V_A)^2} \quad (19)$$

onde, V_M é o valor médio obtido entre os valores reais dos níveis baixo (V_A) e alto (V_B) e V_i é o valor real do nível i a obter.

Tabela 3.5. Matriz para um planejamento fatorial de 2^3 .

Ensaio	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

3.6.2. Análise da Variância (ANOVA)

Barros Neto; Scarmínio; Bruns (1995) ressaltam que o método mais utilizado para se avaliar numericamente a qualidade de ajuste de um modelo é a Análise de Variância (ANOVA). O exame dos resíduos é fundamental na avaliação da qualidade do ajuste de qualquer modelo. Um modelo que deixe resíduos consideráveis é obviamente um modelo ruim. O modelo ideal não deixaria resíduo algum, pois todas as suas predições coincidiriam com os resultados observados.

Para comparar os desvios em termos quantitativos, utiliza-se a Equação (20), relativa à soma dos quadrados dos desvios, que é denominada de soma quadrática (S.Q.).

$$[S.Q. \text{ em torno da média}] = [S.Q. \text{ devida à regressão}] + [S.Q. \text{ residual}] \quad (20)$$

Uma parte da variação total das observações em torno da média é descrita pela equação de regressão e o restante fica por conta dos resíduos. Quanto **maior** for a fração descrita pela regressão, **melhor** será o ajuste do modelo.

O maior valor possível do coeficiente de regressão R^2 é um (1) e só ocorrerá se não houver resíduo algum e, portanto, se toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. O ajuste do modelo aos dados observados será tanto melhor, quanto mais

perto do valor um estiver o R^2 . Uma análise de variância para um modelo linear com dois parâmetros é apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Análise de variância para o ajuste de um modelo linear com dois parâmetros.

Fonte de Variação	Soma quadrática	Nº de graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	$\Sigma(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	1	$MQ_R = SQ_R$
Resíduos	$\Sigma(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$n - 2$	$MQ_r = SQ_r / (n-2)$
Total	$\Sigma(Y_i - \bar{Y})^2$	$n - 1$	

Fonte: Barros Neto; Scarmínio; Bruns, 1995.

3.6.3. Distribuição F

Myers e Montgomery (1995) afirmam que, para determinar a significância estatística da regressão, deve-se utilizar o teste F, que só é empregado para uma distribuição normal dos resíduos. Quando os erros seguem uma distribuição normal, a análise da variância usa as médias quadráticas para testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa, conforme a Equação (21).

$$F_{1, n-2} = \frac{MQ_R}{MQ_r} \quad (21)$$

onde 1 e $n-2$ são os números de graus de liberdade da média quadrática devida à regressão e da média quadrática residual, respectivamente.

Pode-se testar a hipótese nula para $\beta_1 = 0$ usando-se o valor efetivamente calculado para MQ_R / MQ_r , comparando-se com o valor tabelado de $F_{1, n-2}$ no nível de confiança desejado. Verificado que MQ_R / MQ_r é maior que o valor tabelado de $F_{1, n-2}$ a possibilidade que $\beta_1 = 0$ deve ser descartada. Desta forma, existe evidência estatística

suficiente para apresentar uma relação linear entre as variáveis y e x , ou seja, quanto maior o valor de MQ_R / MQ_r , melhor.

Box; Hunter e Hunter (1978) sugerem que, para uma regressão ser estatisticamente significativa e também útil para fins preditivos, o valor da razão MQ_R / MQ_r deve ser no mínimo de quatro a cinco vezes o valor de $F_{1, n-2}$ tabelado .

3.6.4. Método do valor P

Triola (1999) afirma que um dos métodos de teste de hipóteses de uma afirmação sobre uma média é o *método do valor P*. Dada uma hipótese nula e um conjunto de dados amostrais, o valor P reflete a plausibilidade de se obter tais resultados no caso da hipótese nula ser, de fato, verdadeira. Um valor P muito pequeno, como 0,05 ou menos, sugere que os resultados amostrais são muito improváveis sob a hipótese nula; um valor tão pequeno de P constitui evidência contra a hipótese nula. Os valores P são interpretados da seguinte forma:

- a) $P < 0,01$ - Elevada significância estatística (evidência muito forte contra a hipótese nula);
- b) $0,01 \leq P \leq 0,05$ - Estatisticamente significativa (evidência adequada contra a hipótese nula);
- c) $P > 0,05$ - Evidência insuficiente contra a hipótese nula.

3.6.5. Metodologia da Superfície de Resposta

A Metodologia das Superfícies de Respostas (ou *RSM*, do inglês, Response Surface Methodology) é uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais. A Metodologia das superfícies de resposta é composta de duas etapas distintas: **modelagem** e **deslocamento**. Estas etapas são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de se atingir uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada. A modelagem é o ajustamento dos modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos. O deslocamento dá-se ao longo do caminho de máxima

inclinação de um determinado modelo. Na metodologia das superfícies de resposta nem o número de variáveis nem o número de respostas constituem uma restrição.

3.6.6. Ajuste e Interpretação de Modelos de Segunda Ordem

Nas proximidades do ótimo, usualmente é empregado um modelo de segunda ordem para que seja possível a obtenção de uma estimativa mais precisa da condição ideal de operação do processo. A Equação (22) apresenta o modelo de segunda ordem, expresso em termos das variáveis codificadas, mas restringida à situação de apenas dois fatores envolvidos.

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (22)$$

3.6.6.1. Planejamentos para o Ajuste de Modelos de Segunda Ordem

Para estimar os parâmetros deste modelo deve-se dispor de observações em pelo menos três diferentes níveis de cada fator. Pode-se utilizar um experimento 3^K completo (K fatores em três níveis) para o ajuste do modelo de segunda ordem. Os planejamentos 3^K não são rotacionáveis e é necessário um elevado número de experimentos.

Existem classes de planejamentos que podem ser utilizadas em lugar dos experimentos 3^K completos e que apresentam propriedades mais adequadas. Duas classes de planejamento que fazem um uso mais eficiente dos ensaios realizados, em comparação aos fatoriais 3^K , são os **Planejamentos Centrais Compostos** e os **Planejamentos Box-Behnken**. Estas duas classes de planejamento são frações dos fatoriais 3^K que requerem apenas observações suficientes para estimar os coeficientes de segunda ordem da superfície de resposta. Além disso, esses planejamentos podem ser construídos de forma que sejam rotacionáveis.

3.6.7. Planejamento Central Composto.

Werkema & Aguiar (1996) relacionam abaixo as etapas de construção do Planejamento Central Composto:

- a) Construir um experimento fatorial 2^K completo ou fracionado, com os níveis dos fatores codificados com +1 e -1. Esta parte do experimento é denominada *porção fatorial do planejamento*. O número de ensaios da porção fatorial do planejamento é identificado por n_f ;
- b) Adicionar dois pontos axiais ao longo do eixo correspondente a cada fator do planejamento, a uma distância α do centro da região experimental. Será adicionado à porção fatorial um total de $n_\alpha = 2K$ pontos axiais. Estes pontos são representados, para os níveis dos fatores sob a forma codificada, pela notação:

$$(\pm \alpha, 0, 0, \dots, 0)$$

$$(0, \pm \alpha, 0, \dots, 0)$$

.

.

.

$$(0, 0, 0, \dots, \pm \alpha)$$

onde, α é uma constante cujo valor pode ser escolhido de forma que o planejamento seja rotacionável ou satisfaça alguma outra propriedade desejável. Esta parte é denominada de *porção axial do planejamento*;

- c) Adicionar n_C observações repetidas no centro do planejamento ou à seqüência de realização dos ensaios.

Nos planejamentos centrais compostos, o número total de ensaios que devem ser realizados (N) é a soma das porções do planejamento, conforme a Equação (23):

$$N = n_f + n_\alpha + n_C = 2^K + 2K + n_C \quad (23)$$

A escolha que torna um planejamento central composto rotacionável é $\alpha=(n_f)^{1/4}$. A escolha do valor de n_C faz com que o planejamento também apresente a propriedade conhecida como precisão uniforme. Esta precisão uniforme garante maior proteção contra vícios na estimativa da superfície de resposta, para pequenos afastamentos do centro da região experimental.

A Tabela 3.7 apresenta os parâmetros para a construção de planejamentos centrais compostos de precisão uniforme, para diversos valores do número de fatores (K).

Tabela 3.7. Parâmetros de construção de planejamentos compostos de precisão uniforme.

K	3
n_f	8
n_α	6
n_C (precisão Uniforme)	6
N (precisão uniforme)	20
α	1,682

Fonte: Myers & Montgomery,1995.

Barros Neto; Scarmínio; Bruns (2001) chamam a atenção para o valor de α que costuma ficar entre 1 e \sqrt{K} . Quando $\alpha = \sqrt{K}$, os pontos cúbicos e os pontos axiais ficam sobre a superfície de uma esfera, e o planejamento é chamado de **esférico**. Quando $\alpha = 1$, os pontos axiais se localizam nos centros das faces do cubo definido pela parte cúbica do planejamento.

A rotabilidade é um dos critérios para a escolha do valor de α e depende de como os fatores foram codificados. Em geral, a rotabilidade do planejamento será destruída ao se precisar fazer transformações das variáveis usando diferentes escalas. Para um planejamento cuja porção cúbica seja um fatorial completo ou um fatorial fracionário de resolução V, a rotabilidade é obtida ao se fazer $\alpha = (n_f)^{1/4}$.

As repetições no ponto central têm duas finalidades: fornecer uma medida do erro puro e estabilizar a variância da resposta prevista. Para estabilizar a variância, uma regra

Capítulo 3: Aspectos Teóricos e Revisão da Literatura

prática é fazer de 3 a 5 ensaios repetidos se α estiver próximo de \sqrt{K} , e somente um ou dois a mais se estiver perto de 1. Para obter uma estimativa do erro sabe-se que quanto mais repetições melhor.

4. Materiais e métodos

Neste capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados em laboratório e no campo para a obtenção dos resultados mostrados no capítulo 5.

Inicia-se com os métodos e materiais empregados no laboratório. Faz-se a determinação das propriedades físico-químicas das fases fluidas envolvidas, que são a água produzida e as fases orgânicas aguarrás e querosene de aviação (QAV). Em seguida mostra-se a metodologia empregada para a determinação do diâmetro da gota transportadora e para a realização dos testes de avaliação da eficiência de separação óleo/água do protótipo do MDIF em laboratório.

Na seqüência é focalizada a metodologia utilizada na extrapolação de escala do aparelho de laboratório para a unidade de tratamento de campo, a construção das partes constituintes, a montagem dos equipamentos sobre *skid* metálico, o transporte destes de Natal até o Pólo Industrial de Guamaré, além de sua instalação no campo e condicionamento de tubulações e equipamentos para a entrada em operação.

Finaliza-se com o método empregado para a realização dos testes de avaliação da eficiência de separação óleo/água da unidade de tratamento em campo.

4.1. Etapa de laboratório.

4.1.1. Propriedades físico-químicas das fases fluidas

A determinação das propriedades físico-químicas em sistemas envolvendo fases fluidas constitui etapa imprescindível para a compreensão dos fenômenos físicos e/ou químicos que ocorrem no processo. Muitos problemas de operação e de baixos rendimentos em processos industriais podem ser explicados através do conhecimento das propriedades físico-químicas das fases envolvidas.

No caso presente, as propriedades físico-químicas da água produzida e dos orgânicos aguarrás e QAV de maior interesse são: ***densidade, viscosidade, tensão superficial e tensão interfacial***. Outras propriedades foram determinadas, com o objetivo de se obter um maior conhecimento do sistema em estudo. Os valores medidos das diversas propriedades serão utilizados nos testes de laboratório e de campo, como também nos cálculos de extrapolação de escala do equipamento. As várias técnicas de medidas utilizadas para a determinação das propriedades físico-químicas estão descritas no Anexo 1.

4.1.2. Testes com o equipamento em laboratório.

No estudo em laboratório utilizou-se um protótipo do MDIF para gerar os dados da medida da gota transportadora produzida no prato perfurado. Este estudo viabilizou a realização de testes exploratórios para obtenção da eficiência de separação. Os dados obtidos são apresentados a seguir juntamente com a análise hidrodinâmica para as etapas de processo do MDIF, a saber a mistura, os escoamento através do prato perfurado e da coluna de decantação. Os dados são utilizados como parâmetros para a realização da extrapolação de escala.

4.1.2.1. Metodologia para a medida do diâmetro da gota transportadora

A técnica da caracterização do tamanho das gotas transportadoras foi desenvolvida pela Universidade de Clausthal (Alemanha), Vogelpohl et al., (1994). O princípio de funcionamento consiste em registrar os diferentes índices de refração entre as duas fases líquidas presentes em uma amostra contida no interior de um capilar. Os dados coletados são tratados pelo software Hydromess 1.40.

A escolha do capilar é baseada em dois critérios: o diâmetro da gota transportadora deve ser maior do que a metade do diâmetro do capilar e, no máximo, cinco vezes o diâmetro deste. As gotas com diâmetros nesta faixa podem ser avaliadas com um desvio máximo de 10%. A redução deste desvio pode ser obtida com a calibração da sonda fotoelétrica (Figura 4.1) com gotas de diâmetros conhecidos, encontrando-se, desta forma, um fator de correção para o aparelho. Para isso utilizou-se

uma bureta automática Marca Metrohm – Mod. 725 Dosimat de precisão 0,001 ml. O capilar imerso em aguarrás succiona a gota de índice de refração conhecido fazendo-a passar pela sonda fotoelétrica. Desta forma os valores do fator de correção são calculados.

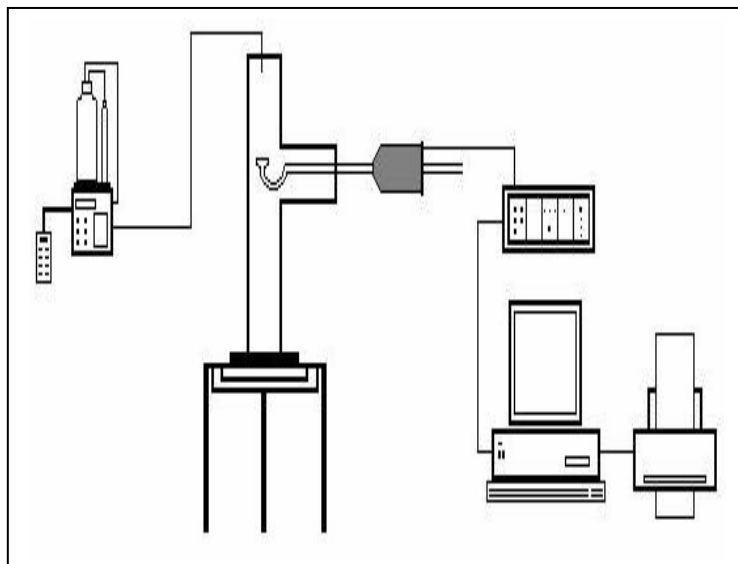


Figura 4.1 – Representação da calibração da sonda fotoelétrica.

A Figura 4.2 mostra um esquema básico de funcionamento da técnica de medida utilizando o sistema capilar-sonda fotoelétrica inserido no MDIF de laboratório.

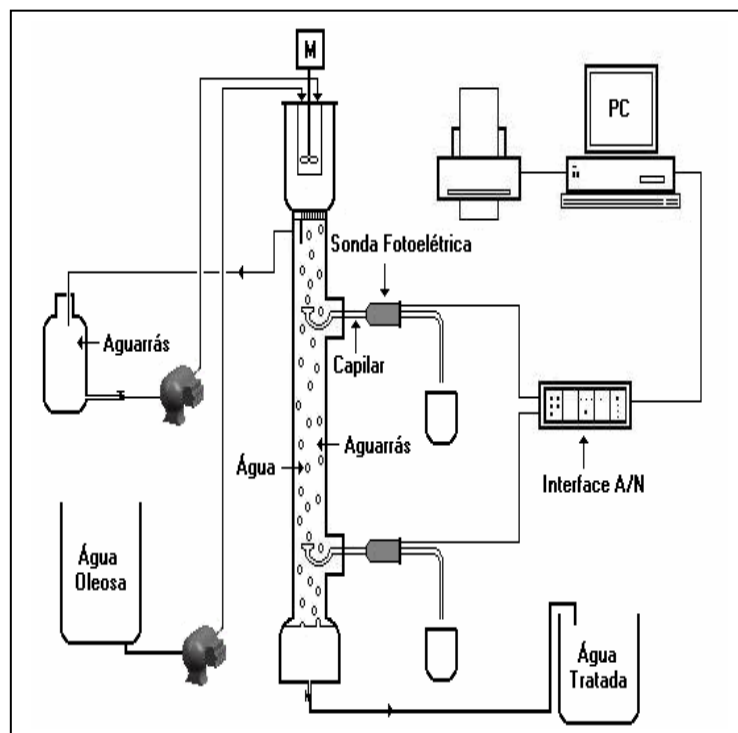


Figura 4.2 – Representação da técnica de medida das gotas transportadoras.

As gotas transportadoras geradas pelo prato perfurado entram em um capilar de diâmetro devidamente escolhido. Essas gotas são succionadas e alongadas na forma de cilindros dentro do capilar. A velocidade e o comprimento desses cilindros são medidos por uma sonda fotoelétrica conectada ao capilar que registra os diferentes índices de refração entre a fase dispersa (cilindros) e o meio contínuo no interior do capilar. O tratamento dos dados se faz por computador que recebe o sinal de uma interface analógica/digital.

A sonda fotoelétrica se compõe essencialmente por duas células luminosas constituídas por uma pequena lâmpada e um fototransmissor. Quando ocorre a passagem do conjunto de gotas, as células detectam e registram o início e o fim de cada uma dessas gotas com base nos seus respectivos índices de refração. As células são espaçadas precisamente de dois milímetros e dispõem-se a 90° uma da outra, gerando desta forma um sinal bruto que é tratado numericamente e representado sob a forma de um sinal quadrado.

Os testes se desenvolveram com uma variação da vazão efetiva, velocidade de agitação e razão volumétrica entre as fases orgânica e aquosa introduzidas na câmara de mistura. As medidas foram realizadas em tempo real durante a operação do equipamento, buscando assim a caracterização do tamanho e distribuição das gotas obtidas através da alteração dessas variáveis de processo.

4.1.2.2. Metodologia para a realização dos testes de eficiência em laboratório.

Este módulo tem como objetivo a realização dos testes exploratórios em laboratório utilizando um Planejamento Estatístico Experimental visando obter dados para subsidiar o *scale-up* do equipamento. O planejamento experimental é semelhante ao aplicado no equipamento de campo. As variáveis: relação volumétrica orgânico/aquoso O/A, vazão específica ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$) e velocidade periférica do agitador (m/s), **serão iguais para o planejamento dos testes exploratórios em laboratório e para os testes com o novo equipamento instalado no campo.**

Realizou-se um planejamento experimental de dois níveis do tipo central composto para as variáveis que interferem na eficiência de separação do aparelho, tais como, vazão efetiva, velocidade de agitação na câmara de mistura e relação volumétrica orgânico/aquoso.

Na análise dos dados da eficiência de separação para o extratante aguarrás utilizou-se o método das superfícies de resposta com software adequado a tratamento estatístico. Neste módulo empregou-se um planejamento do tipo central composto, tendo como porção fatorial o planejamento fatorial completo do tipo 2^3 , com seis repetições no ponto central e ampliação do tipo estrela.

4.1.2.2.1. Sistema Estudado.

A fase aquosa objeto do trabalho é a água produzida contaminada com óleo. Esta água se constitui em amostra real proveniente da indústria do petróleo. O Local de coleta é à entrada do SAO-533401 da ETE do Pólo Industrial de Guamaré/RN. Neste ponto ainda não ocorreu a injeção do polieletrólito utilizado na flotação. Devido ao tempo entre a coleta no campo e o transporte até o Laboratório, pode haver uma decantação natural do óleo emulsionado. Por este motivo, se faz necessário uma redispersão da amostra antes da sua admissão ao aparelho de separação MDIF.

A fase orgânica utilizada é uma mistura complexa de hidrocarbonetos denominada “aguarrás”, coletada no V-40005 da Unidade de Processamento de Gás Natural I (UPGN-I) da Petrobras.

Para os ensaios, fixou-se a altura da câmara de decantação em 1,0m e a concentração de óleo na água produzida que alimenta o aparelho na faixa entre 50 a 150 mg/L, condição esta similar às encontradas na entrada do SAO. O prato de laboratório contém 100 furos de 1mm de diâmetro cada.

As variáveis estudadas são: a vazão efetiva total, a relação volumétrica O/A e a velocidade de agitação na câmara de mistura.

4.1.2.2.2. Método Analítico

Para a análise da quantidade de óleo nas amostras de água da entrada e saída do MDIF empregou-se o método padrão de determinação do teor de óleo e graxas (TOG) por absorção de radiação na região do infravermelho. O equipamento utilizado para estas determinações é o InfraCal® TOG/TPH Modelo HATR-T2 da Wilks Enterprise, Inc.

4.1.2.2.3. Programas Computacionais

Para desenvolvimento do planejamento experimental e da análise dos dados obtidos neste estudo, foi utilizado o programa computacional StatisticaTM - Experimental Design versão 5.5.

4.1.2.2.4. Procedimento Experimental

A Figura 4.3 mostra o esquema de operação com o misturador-decantador à inversão de fases, com ênfase nos fluxos do orgânico e do aquoso.

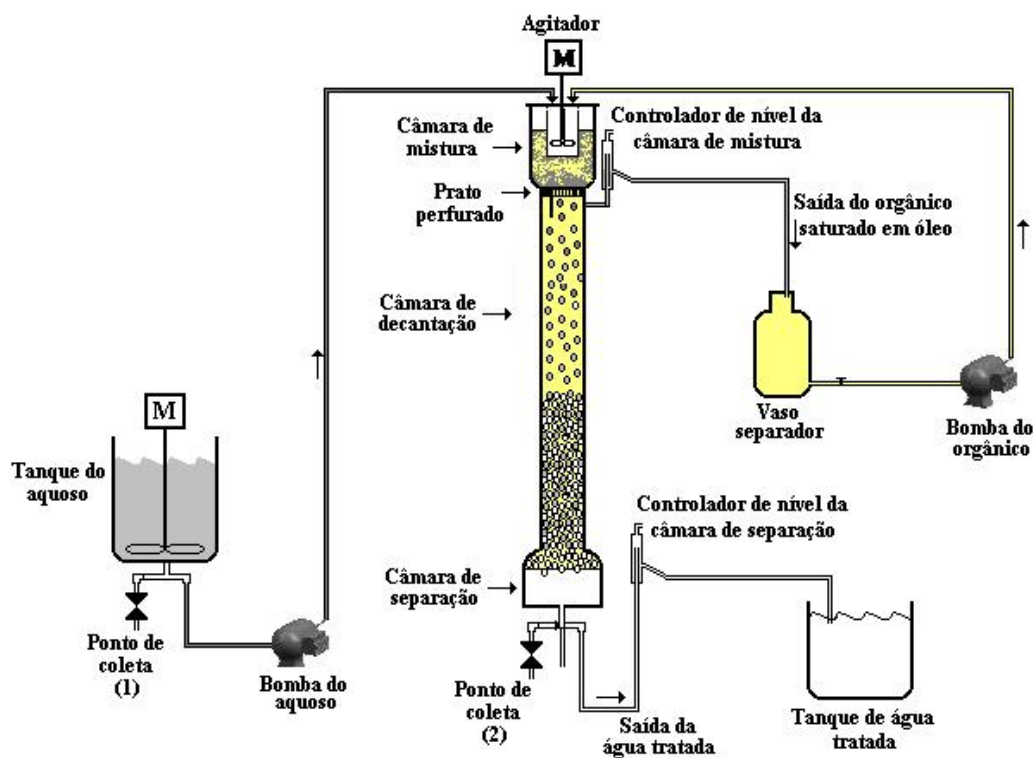


Figura 4.3. Esquema de operação com o MDIF.
(fonte: Moraes, 2005).

A água emulsionada armazenada no tanque do aquoso é mantida sob agitação constante para manter o óleo disperso. O ponto de coleta da amostra da água para análise situa-se na saída para a bomba do aquoso, em fluxo. A água é bombeada pela bomba do aquoso para o topo do MDIF, entrando no aparelho através do reator existente na câmara de mistura.

A aguarrás é bombeada do vaso separador para a câmara de mistura através da bomba do orgânico. Observa-se que as duas fases são admitidas no reator em corrente. Promove-se a agitação no sistema através do agitador com a finalidade de transferir o óleo da fase aquosa para o solvente orgânico. A dispersão “*orgânico carregado em óleo/água de formação*” transborda e atinge o leito de orgânico puro sobre o prato perfurado. A dispersão “*orgânico carregado em óleo/água de formação*” passa pelo prato perfurado alcançando a câmara de decantação que está totalmente cheia do solvente orgânico. Forma-se deste modo uma cascata de gotas de água chamada “gotas transportadoras” que contém em seu interior pequenas gotículas transportadas de solvente orgânico já carregado em óleo. As gotas transportadoras ao percorrerem o leito orgânico da câmara de decantação vão liberando as gotículas transportadas até chegar à base do MDIF. Na base do MDIF, as gotas transportadoras contêm no seu interior pouca ou nenhuma gotícula do orgânico transportado. O sistema possui no interior da câmara de decantação o solvente orgânico como fase contínua e as gotas transportadoras de água como fase dispersa. Assim sendo, ocorreu no prato perfurado *uma inversão de da natureza das fases (contínua/dispersa)* em relação às fases admitidas na câmara de mistura. É esta inversão que justifica o nome de ***método da inversão de fases***.

Na câmara de separação, a gota transportadora atinge a interface orgânico-aquoso, onde coalesce. A água tratada sai pela base da câmara de separação, onde é realizada a coleta da amostra para análise, dirigindo-se para o tanque de água tratada.

O orgânico saturado em óleo sai do MDIF pelo topo da câmara de decantação e é acumulado no Vaso Acumulador de Orgânico, onde se pode separar algum volume aquoso que tenha sido arrastado. O orgânico é novamente bombeado para a câmara de mistura do MDIF, em circuito fechado até sua completa saturação.

A coleta da amostra de água tratada na saída do aparelho é realizada da seguinte forma: inicia-se a coleta da água tratada pela identificação do ponto de coleta que se localiza na base da câmara de separação (identificado na Figura 4.4), em linha com a saída de água tratada do misturador-decantador. Após o tempo de regime calculado para o teste, abre-se uma quantidade para descarte e coleta-se em frascos de vidro de 1.000 ml a amostra a ser analisada.



Figura 4.4. Tomada de amostra na saída de água tratada do MDIF.

A realização da coleta da amostra de água de entrada no tanque de água emulsionada é procedida da seguinte forma: inicia-se pela identificação do ponto de coleta que se situa na saída do tanque de água emulsionada (identificado na Figura 4.5), paralelo ao fluxo de água para a sucção da bomba do aquoso. Abre-se a válvula de coleta para tambor de descarte atmosférico para tornar a amostra representativa. Após este descarte, procede-se a coleta para os frascos coletores.



Figura 4.5. Tomada de amostra da água oleosa na saída do tanque.

4.1.2.2.5. Etapas da formulação do Planejamento Central Composto

O procedimento para a formulação do Planejamento Central Composto, parte da triagem das principais variáveis de processo que influenciam a eficiência de separação. Estas variáveis foram selecionadas com base em trabalhos anteriores, Hadjiev e Kuychoukov (1989), Paulo et al., (1993, 1994, 1996), Hadjiev e Aurelle (1995), Chiavenato (1999), Fernandes Júnior (2002).

Realiza-se a codificação das principais variáveis selecionadas (Tabela 4.1) através da Equação (19). As variáveis independentes adotam a seguinte denominação:

- a) X_{vaz} = Vazão efetiva total (L/h);
- b) X_{rel} = Relação volumétrica orgânico / aquoso (O/A);
- c) X_{agit} = Velocidade de agitação na câmara de mistura (rpm);

Tabela 4.1: Valores reais e codificados das variáveis para testes de laboratório.

Valores codificados	Valores reais das variáveis independentes		
	X_{rel}	X_{vaz} L / h [específica, $m^3 m^{-2} h^{-1}$]	X_{agit} rpm [veloc. periférica, m/s]
-1,682	1/6	47 - [23,3]	650 - [1,02]
-1	1/5	57 - [28,3]	692 - [1,10]
0	1/3	71 - [35,4]	750 - [1,18]
1	2/5	85 - [42,5]	808 - [1,27]
1,682	1/2	95 - [47,4]	850 - [1,34]

4.1.2.2.5.1. Cálculo da porção fatorial do planejamento (n_f)

O número de variáveis independentes K é igual a três. O número de variáveis dependentes (resposta) é igual a um. Esta variável resposta corresponde à eficiência de separação para o equipamento.

O planejamento fatorial completo 2^K é igual a 8 experimentos. A porção fatorial do planejamento n_f terá 8 experimentos de acordo com a Tabela 4.2 abaixo, construída utilizando as informações da Tabela 3.5.

Tabela 4.2. Valores da porção fatorial do planejamento central composto para o MDIF.

Teste	X_{vaz}	X_{rel}	X_{agit}
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

4.1.2.2.5.2. Cálculo da porção axial do planejamento (n_α)

O número de pontos axiais representados sob a forma codificada pela porção axial do planejamento (n_α) é dado por $n_\alpha = 2K$ sendo igual a 6 experimentos. Os valores codificados da porção axial do planejamento são apresentados na Tabela 4.3.

O valor de α , para que o planejamento seja considerado rotacionável, é calculado de acordo com a Equação (24).

$$\alpha = (n_f)^{1/4} = (8)^{1/4} = 1,6818 \quad (24)$$

Tabela 4.3. Valores da porção axial do planejamento central composto para o MDIF.

Teste	X_{vaz}	X_{rel}	X_{agit}
9	- 1,682	0	0
10	1,682	0	0
11	0	- 1,682	0
12	0	1,682	0
13	0	0	- 1,682
14	0	0	1,682

4.1.2.2.5.3. Cálculo da porção central do planejamento (n_C)

O número de pontos da porção central (n_C) é dado, segundo Myers e Montgomery (1995), como 6 testes. A Tabela 4.4 apresenta os valores codificados da porção central do planejamento.

Tabela 4.4. Valores da porção central do planejamento central composto para o MDIF.

Teste	X_{vaz}	X_{rel}	X_{agit}
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

4.1.2.2.5.4. Cálculo do número total de ensaios do planejamento central composto.

O número total de ensaios do planejamento central composto (N) para o MDIF será a soma dos ensaios individuais da porção fatorial (n_f), da porção axial (n_α) e da porção central do planejamento (n_C) e é dado pela Tabela 4.5. Desta forma calculou-se o número total de ensaios como: $N = n_f + n_\alpha + n_C$, sendo igual a 20 experimentos.

Tabela 4.5. Valores codificados das variáveis independentes e número total de ensaios do planejamento central composto para o MDIF - laboratório.

Teste	X _{conc}	X _{rel}	X _{vaz}
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1,682	0	0
10	1,682	0	0
11	0	-1,682	0
12	0	1,682	0
13	0	0	-1,682
14	0	0	1,682
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Este planejamento codificado também será utilizado para os testes exploratórios com o MDIF em campo, visto que se leva em consideração os valores codificados, comuns a ambos os testes.

Além do planejamento codificado, os testes de laboratório e de campo têm em comum os valores das variáveis: relação volumétrica O/A; vazão específica (m³/m²h) e a velocidade periférica do agitador (m/s).

4.1.2.2.5.5. Aleatorização dos testes.

Utilizou-se a aleatorização dos experimentos, onde a ordem e alocação dos experimentos são utilizadas ao acaso, com a finalidade de evitar que os efeitos dos fatores não-controlados afetem a variável resposta. A aleatorização dos ensaios permite o balanceamento das medidas e evita possíveis confusões na avaliação dos resultados. A Tabela 4.6 apresenta as condições operacionais dos testes com valores reais para a

realização dos experimentos em laboratório de acordo com o planejamento central composto.

Tabela 4.6. Condições operacionais para os ensaios de laboratório com o MDIF.

Nº teste	Vazão Total (L/h)	O/A	Agitação (rpm)
19	71	1/3	750
8	85	2/5	808
3	57	2/5	692
12	71	1/2	750
16	71	1/3	750
1	57	1/5	692
6	85	1/5	808
10	95	1/3	750
14	71	1/3	850
15	71	1/3	750
5	57	1/5	808
11	71	1/6	750
18	71	1/3	750
2	85	1/5	692
13	71	1/3	650
20	71	1/3	750
9	47	1/3	750
4	85	2/5	692
17	71	1/3	750
7	57	2/5	808

4.2. Metodologia para a extrapolação de escala do equipamento de laboratório para o de campo.

Este módulo envolve a concepção do protótipo em escala semi-industrial, a metodologia empregada para dimensionamento das principais partes do equipamento, bem como a estratégia empregada. Detalha-se o projeto básico do equipamento de campo e suas adequações à realidade de uma unidade de tratamento em área industrial.

O misturador-decantador à inversão de fases (MDIF) é dividido em duas operações unitárias principais: a mistura e a separação. O aparelho tem características de um misturador-decantador convencional e de uma coluna spray. Ele é constituído de quatro partes principais: a câmara de mistura, o prato perfurado, a câmara de decantação e a câmara de separação.

Adotou-se no processo de extrapolação, para todas as partes componentes, a **similaridade geométrica**. Esta metodologia estabelece que as relações entre as dimensões geométricas sejam as mesmas para as duas escalas, a escala de laboratório e a semi-industrial.

Os cálculos de extrapolação foram realizados utilizando-se as propriedades físico-químicas das fases mutuamente saturadas, apresentadas na Tabela 5.4 porque esta será a real situação no campo.

A concepção foi realizada em duas etapas distintas, quais sejam: a extrapolação do protótipo em escala semi-industrial e a extrapolação dos outros equipamentos, instrumentos e acessórios que compõem a unidade de tratamento UT-MDIF. As memórias de cálculo utilizadas na extrapolação de escala estão no Anexo 2.

4.3. Construção dos equipamentos e montagem da unidade no campo.

Este módulo tem como objetivo descrever a forma de construção dos equipamentos componentes do protótipo da UT-MDIF e sua respectiva montagem nas instalações de campo da Petrobras.

Adquiriram-se os equipamentos e acessórios componentes do protótipo e realizou-se a sua construção. Após esta etapa efetivou-se a montagem dos equipamentos que compõem o sistema nas instalações do Pólo Industrial de Guamaré.

As etapas de aquisição, construção e montagem dos equipamentos foram realizadas entre o período de junho de 2003 a abril de 2005.

Esta etapa está dividida em cinco partes principais devidamente registradas, organizadas em ordem temporal e acompanhadas conforme descritas a seguir:

- a) Construção dos equipamentos da UT-MDIF;
- b) Transporte da Unidade de Natal a Guamaré;
- c) Montagem no Pólo Industrial de Guamaré;
- d) Limpeza dos equipamentos e tubulações;
- e) Teste hidrostático da unidade.

A Unidade UT-MDIF, em concordância com os Técnicos da Petrobras, foi projetada e montada sobre skid (estrutura metálica), visando sua melhor segurança, mobilidade e menor custo.

4.4.1. Construção dos equipamentos e montagem da UT-MDIF

Esta etapa compreende a aquisição dos equipamentos, instrumentos e acessórios, bem como a construção dos equipamentos não disponíveis no mercado, tais como: vaso de fibra de vidro estrutural; coluna de fibra de vidro estrutural composta de duas câmaras e dois módulos de colunas; prato perfurado; agitador do reator; reator em aço inoxidável e suporte do motor do agitador.

O vaso de armazenagem do orgânico em construção na empresa Hemfibra (Distrito industrial de Natal/RN) está mostrado na Figura 4.6. No detalhe observa-se a configuração cilíndrica. O material utilizado para a confecção do vaso foi a fibra de vidro estrutural.



Figura 4.6: Vaso de armazenagem do orgânico em construção.

A Câmara de Separação em fibra de vidro estrutural em construção na empresa Hemfibra (Distrito industrial de Natal/RN) está mostrada na Figura 4.7. No detalhe a boca de visita para realização de inspeção e limpeza. Observam-se os flanges de saída para os instrumentos de medição de nível de líquido. Na parte superior o flange de conexão com a câmara de decantação.



Figura 4.7: Câmara de Separação em construção.

O Reator da Câmara de Mistura confeccionado em aço inoxidável em construção na empresa Usinox (Conjunto Cidade Satélite -Natal/RN) está mostrado na Figura 4.8. No detalhe vêem-se as tubulações de entrada do aquoso e orgânico, os orifícios de saída do aquoso para a câmara de mistura, bem como os defletores dispostos diametralmente.



Figura 4.8: Reator da Câmara de Mistura em construção.

A aquisição e construção do prato perfurado foi uma das etapas mais complexas da montagem havendo necessidade de se realizar algumas modificações em relação ao projeto inicial.

A placa adquirida no mercado para confecção do prato tem espessura de 30mm, pois não haviam placas de 20mm disponíveis. As brocas comerciais de 1mm disponíveis não conseguiram se manter intactas durante a perfuração. Esta furação, devido à espessura do material e o diâmetro do furo a ser obtido, não contava com sistemas industrializados e automatizados. Assim sendo, a furação foi executada manualmente, demandando um longo tempo e habilidade do operador. O corte, furação, montagem e acabamento final foi totalmente manual e efetivado nas instalações da oficina mecânica da UFRN.

Fez-se um rebaixe igual na área disponível para os furos, transformando-a em uma espessura de 15mm. Manteve-se a espessura da área cega em 30mm, necessária à fixação da placa defletora.

Utilizou-se uma broca de 1,2mm para executar os furos no prato, pois ocorriam constantes danos nas brocas de 1mm. A área a ser perfurada é mantida em **0,01m²**. A área de cada orifício ($d = 1,2\text{mm}$) é de $1,131 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Desta forma o número total de furos passou a ser de **10.057** para que fosse mantida a transparência calculada no projeto. As dimensões finais, após confecção do prato são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Principais dimensões do prato perfurado do equipamento de campo.

Dimensões	Valores
Diâmetro interno	600 mm
Diâmetro externo	700 mm
Espessura externa	30mm
Espessura da área transparente	15 mm
Altura do defletor	200mm
Espessura do defletor	20mm
Distância do defletor à borda do prato	150mm
Diâmetro dos furos	1,2mm
Número de furos	10.057
Transparência	5%
Área cega	1/4
Material de construção	Technyl

Na Figura 4.9 vê-se o prato perfurado em construção na oficina da mecânica da UFRN. O material de construção foi o Technyl. No detalhe observa-se o defletor dividindo a área de passagem (maior) da área cega (menor). Observa-se a existência dos orifícios periféricos para fixação dos parafusos, o rebaixe na parte central do prato, bem como as grandes dimensões do prato de campo.



Figura 4.9: Prato perfurado em construção.

Na Figura 4.10 mostra-se a UT-MDIF em montagem sobre skid metálico na empresa Sitec (Distrito industrial de Natal/RN). No detalhe o vaso acumulador de orgânico, a câmara de separação e um dos módulos da câmara de decantação. Observam-se as tubulações sendo montadas e interligadas aos equipamentos.



Figura 4.10: UT-MDIF em montagem sobre skid metálico.

4.3.2. Transporte da Unidade UT-MDIF da fábrica ao Pólo Guamaré

O transporte do skid metálico contendo a UT-MDIF, montada na Empresa Sitec, de Natal até o Pólo Industrial de Guamaré foi efetivado por carreta especial com prancha baixa e carro batedor.

A Figura 4.11 mostra a operação de içamento do skid para a carreta transportadora, realizado por caminhão munk. Observa-se que o vaso acumulador, a câmara de separação, as tubulações a esta interligada, além das válvulas de controle (azul) foram montadas no próprio skid. Os demais equipamentos, tubulações e acessórios foram acondicionados em caixas de madeira ou amarrados com fins de evitar danos.



Figura 4.11: Operação de içamento do skid.

A Figura 4.12 mostra o momento de chegada da carreta transportando o skid ao Pólo Industrial de Guamaré em dezembro de 2003. Observa-se que os equipamentos foram desconectados para o transporte. Na lateral da prancha foram amarradas as tubulações e os instrumentos de controle de nível (caixa de madeira).



Figura 4.12: Chegada da carreta transportando o skid ao Pólo Industrial de Guamaré.

4.3.3. Instalação e montagem da UT-MDIF no Pólo Guamaré

A UT-MDIF foi instalada próxima ao SAO-533401 da Estação de Tratamento de Efluentes do Pólo Industrial de Guamaré (Petrobras). Para o início da montagem teve de se cumprir várias exigências de segurança, além de liberação pelo órgão estadual ambiental, permissões para trabalho, inspeções de equipes especialistas na montagem em áreas classificadas, montagem de andaimes, guindastes, entre outros. Devido a estas necessidades houve a demanda de um maior tempo de execução.

A etapa de instalação e montagem compreendeu três disciplinas fundamentais: mecânica, elétrica e instrumentação. As etapas de interligação das tubulações com o processo e as etapas de elétrica e instrumentação foram concluídas em setembro de 2005.

A Figura 4.13 mostra parte da instalação e montagem da UT-MDIF. No detalhe a montagem do sistema elétrico da UT-MDIF, onde vê-se a montagem do transformador, próximo ao container que serviu de abrigo para painéis elétricos e o PLC.



Figura 4.13: Montagem do sistema elétrico da UT-MDIF.

Observa-se na Figura 4.14, a montagem da coluna de decantação da UT-MDIF. No detalhe a montagem do flange de interligação entre a câmara de decantação e a câmara de separação. Verifica-se os cuidados com a segurança do operário que trabalha em local elevado, bem como os documentos de permissão para o trabalho afixadas em local visível na base dos andaimes.



Figura 4.14: Montagem da coluna da UT-MDIF.

A montagem da câmara de mistura da UT-MDIF pode ser observada na Figura 4.15. No detalhe nota-se a instalação do reator no topo da câmara e a utilização de máquinas de grande porte, tais como guindastes. Verifica-se a presença constante de andaimes para a movimentação dos operários em locais elevados.



Figura 4.15: Montagem do reator da câmara de mistura da UT-MDIF.

4.3.4. Lavagem das linhas e teste hidrostático da UT-MDIF

Após a montagem dos equipamentos, tubulações e acessórios realizou-se a lavagem das linhas com água para a retirada de sujeira e objetos do interior das mesmas. Utilizou-se a água dos hidrantes da rede de incêndio do Pólo Guamaré com conectores para a interligação com a UT-MDIF.

O teste hidrostático foi realizado após a lavagem das linhas e objetivou verificar vazamentos pelas juntas, flanges e conexões da unidade. O teste foi realizado em setembro de 2005.

A lavagem das linhas e equipamentos do processo da UT-MDIF envolve a preparação com dispositivos próprios para limpeza. No detalhe, pesquisador da UFRN

conectando dispositivo de lavagem na tubulação de descarga da bomba do aquoso, conforme a Figura 4.16.



Figura 4.16: Preparação para a lavagem das linhas e equipamentos.

No detalhe da Figura 4.17 verifica-se a saída da água limpa na etapa final de limpeza das linhas e equipamentos do processo da UT-MDIF. Observa-se a elevada vazão de lavagem visando arrastar sólidos depositados nas tubulações que poderiam obstruir os equipamentos do processo.



Figura 4.17. Etapa final de limpeza das linhas e equipamentos.

No detalhe da Figura 4.18 verifica-se a o vazamento de água pelo flange da câmara de decantação após o enchimento da coluna para o teste hidrostático das linhas e equipamentos do processo da UT-MDIF. O aperto dos parafusos e ajuste final foi realizado pela Empresa Hemfibra.



Figura 4.18: Teste hidrostático das linhas e equipamentos do processo.

A Unidade de Tratamento utilizando o Método da Inversão de Fases (UT-MIF) montada na Estação de Tratamento de Efluentes do Pólo Industrial de Guamaré é apresentada na Figura 4.19. Observa-se que a Unidade foi montada sobre skid e no interior do dique de contenção construído de alvenaria. Em primeiro plano vê-se pintado de branco o Vaso Acumulador de Orgânico (V-3409.09-01). À sua direita está montada a bomba do orgânico (B-3409.09-02) com válvula de segurança de pressão (PSV) instalada na descarga, além de tubulações e instrumentos. A tubulação em primeiro plano, não pintada, que se prolonga por sobre o dique é utilizada para a operação de reposição do orgânico, abastecido por caminhão. À esquerda do vaso está instalada a coluna do MDIF (T-3439.09-.1) tendo na base a câmara de separação, enquanto no topo vê-se o motor do misturador (MT-3409.09-01). Verifica-se que a coluna está montada sobre uma base metálica possibilitando que a elevação da parte inferior esteja mais alta que a parede do Separador Água-Óleo possibilitando o retorno da água tratada, via válvula de nível (azul).



Figura 4.19: UT-MDIF montada e operando na ETE do Pólo Guamaré/RN

4.4. Metodologia para os Testes de campo com a UT-MDIF.

4.4.1. Sistema Estudado

A fase aquosa é a água produzida proveniente da entrada do SAO-533401.

A fase orgânica utilizada para a extrapolação, a aguarrás mineral, não foi disponibilizada para a realização dos testes devido haver problemas de logística no transporte para o Pólo Industrial. Assim sendo, a Petrobras disponibilizou o Querosene de Aviação (QAV). O QAV é uma mistura complexa de hidrocarbonetos obtida da Unidade U-270 do Pólo Industrial de Guamaré/RN. Ressalte-se que as propriedades físico-químicas de ambos os orgânicos são similares conforme se observa na Tabela 5.4.

O Anexo 6 mostra o fluxograma de processo do MDIF apresentando todos os fluxos, controles e equipamentos utilizados durante a realização dos ensaios experimentais com a UT-MDIF no campo.

A seguir descreve-se a forma de operação da UT-MDIF, de acordo com o anexo 6. A emulsão óleo em água é succionada da entrada do SAO-533401 e bombeada através da B-01 para a câmara de mistura do MDIF, na parte superior do equipamento. Esta fase aquosa é a primeira a ser admitida no equipamento, tornando-se assim o meio contínuo na câmara de mistura.

O agitador mecânico MT-01 é acionado e em seguida a fase orgânica é bombeada através da B-02 do vaso acumulador para a câmara de mistura de forma que as duas fases aquosa e orgânica são admitidas em fluxo co-corrente.

A agitação do sistema (orgânico-água de produção) é realizada com o objetivo de transferir o óleo da fase aquosa para a fase orgânica. A dispersão solvente carregado em óleo/água transborda e atinge o nível do orgânico sobre o prato perfurado. A dispersão passa pelo prato perfurado, por ação da gravidade, alcançando assim a câmara de decantação que está totalmente preenchida pelo orgânico. Obtém-se assim a cascata de gotas de água denominada de “gotas transportadoras”, contendo no seu interior gotículas de solvente carregado em óleo e chamadas de “gotículas transportadas”. O sistema possui no interior da câmara de decantação T-01 o solvente orgânico constituindo a fase contínua e as gotas transportadoras de água como fase dispersa. Deste modo, ocorre uma **inversão de fases** em relação às fases admitidas na câmara de mistura.

As gotas transportadoras ao percorrerem a câmara de decantação vão liberando as gotículas transportadas até atingir a interface entre o orgânico e o aquoso na câmara de separação, na base do MDIF, onde coalescem. Para uma eficiente separação, as gotas transportadoras, ao chegarem à câmara de decantação devem conter no seu interior pouca ou nenhuma gotícula transportada. A água tratada sai pela base da câmara de separação e retorna ao SAO, alternativamente esta água pode seguir para o flotador.

O orgânico carregado em óleo sai pelo topo da câmara de decantação T-01 do MDIF e retorna para o vaso acumulador de orgânico V-01. Neste vaso, o orgânico é separado de algum aquoso arrastado e é bombeado novamente para a câmara de mistura, operando em circuito fechado até a sua completa saturação.

A eficiência de separação óleo/água é calculada de acordo com a Equação (2).

Nesta equação, C_e é a concentração de óleo em água na entrada do equipamento e C_s é a concentração de óleo em água tratada na saída do equipamento. As concentrações são expressas em mg/L. Estas concentrações são obtidas através do método padrão de determinação do teor de óleo e graxas (TOG) por absorção de radiação na região do infravermelho. O equipamento utilizado para estas determinações é o InfraCal® TOG/TPH Modelo HATR-T2 da Wilks Enterprise, Inc. Ressalte-se que este método tem sido adotado pelo CENPES para este tipo acompanhamento.

As amostras a serem analisadas são coletadas em dois pontos distintos. Na entrada do equipamento é feita a coleta da amostra de água contaminada. A amostra de água tratada é coletada na saída da base da câmara de separação. As amostras de água contaminada e tratada são coletadas após ter atingido o tempo de operação do sistema (t_o), conforme Equação (25). Esta equação é recomendada pela literatura (Trambouze; van Landeghem; Wauquier, 1984), como regra prática para cálculo do tempo necessário para o aparelho atingir o regime estacionário, considerando que o escoamento se caracteriza como do tipo pistão (plug-in-flow):

$$t_o = 7 t_r \quad (25)$$

onde,

t_o = tempo para o sistema atingir o regime estacionário;

t_r = tempo de residência no interior da coluna (h) obtido com base na relação entre o volume total da coluna MDIF e a vazão total pelo equipamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos com o equipamento tanto em laboratório quanto em campo. Os itens 5.1 e 5.2 mostram os resultados obtidos em laboratório, enquanto que o item 5.3 apresenta os resultados com a unidade de tratamento de campo.

Iniciam-se as etapas de laboratório com a análise das propriedades físico-químicas do sistema estudado, utilizadas para a definição do tipo de orgânico a ser utilizado nos testes e nos cálculos de extrapolação de escala. Em seguida realizam-se os testes para a determinação do tamanho da gota transportadora gerada no prato perfurado quando se variam algumas condições de processo, utilizando estes dados para a verificação das condições hidrodinâmicas do equipamento no laboratório e em campo. Finaliza-se com os testes de eficiência de separação do equipamento, visando subsidiar e prover de dados os cálculos da extrapolação de escala.

Para as etapas de campo, primeiramente avalia-se a hidrodinâmica do equipamento construído, visando ratificar os testes de eficiência de separação futuros e compará-los aos valores previstos com os resultados esperados no projeto do equipamento. Em seguida realizam-se os testes de eficiência de separação da unidade de campo com o objetivo de confirmar os resultados obtidos em laboratório e validar a técnica empregada para a extrapolação de escala do equipamento. Analisam-se os dados obtidos e planejam-se novos testes de eficiência de separação deslocando-os para uma região em que se obteve melhores resultados quanto à eficiência no processo de tratamento da água produzida. Após os testes de deslocamento, encontra-se a equação do modelo e simulam-se novas condições, dentro da faixa estudada, visando encontrar as melhores condições de vazão efetiva, relação O/A e velocidade de agitação para a indústria.

5.1- Laboratório: Propriedades físico-químicas

As propriedades físico-químicas de interesse do sistema em estudo são apresentadas nas três tabelas seguintes. Em todas as tabelas, mostra-se entre colchetes o valor do desvio padrão amostral [s].

Na Tabela 5.1 apresentam-se todos os resultados de densidade, viscosidade, tensão superficial e interfacial das fases que constituem o sistema estudado, visando conhecer melhor a água produzida e definir qual orgânico usar para a realização dos testes de laboratório. A água produzida tratada é aquela em que se realizou uma extração em funil de separação utilizando como extratante o hexano P.A.

Tabela 5.1: Densidade, viscosidade, tensão superficial e interfacial para as fases fluidas objeto do estudo.

PRODUTO	Densidade(ρ) x 10 ³ kg/m ³ [s]	Viscosidade (μ) x 10 ⁻³ Pa.s [s]	Tensão superficial (γ) x 10 ⁻³ N/m [s]	Tensão interfacial (γ) x 10 ⁻³ N/m [s]
Água produzida	1,0039 [0.0009]	-	60,16 [0.38]	-
Água produzida tratada	1,0029 [0.0006]	0,859 [0.003]	63,95 [0.11]	-
Água tratada saturada com aguarrás do V-400.05	1,0022 [0.0013]	0,851 [0.002]	70,48 [0.44]	26,50 [0.18]
Água tratada saturada com aguarrás do processo	1,0028 [0.0009]	0,853 [0.001]	61,0 a 51,9 (15 medidas, mas o tensiômetro não estabilizou em 30 minutos)	9,6 a 5,8 (14 medidas, mas o tensiômetro não estabilizou em 30 minutos)
Aguarrás do processo	0,7657 [0.0022]	1,058 [0.001]	27,44 [0.10]	-
Aguarrás do V-400.05	0,7350 [0.0013]	0,769 [0.001]	25,61 [0.17]	-
Aguarrás do processo saturada com água tratada	0,7712 [0.0011]	1,124 [0.002]	26,54 [0.29]	-
Aguarrás do V-400.05 saturada com água tratada	0,7429 [0.0021]	0,907 [0.001]	25,30 [0.15]	-
Petróleo bruto	0,9204 [0.0019]	1.183,950	-	-

Os valores de pH, turbidez, condutividade, alcalinidade e salinidade da água produzida utilizada no processo, saturada em orgânico ou não, são mostrados na Tabela 5.2. Estes dados visam conhecer e entender melhor as propriedades da água produzida quanto à formação de emulsões quando esta água entra em contato com orgânicos de diferentes pontos do sistema que têm características bastante similares. Verifica-se

ainda as características da água produzida após a extração do óleo emulsionado quando se utiliza como solvente o hexano.

Tabela 5.2. pH, turbidez, condutividade, alcalinidade e salinidade para a água produzida e a aguarrás.

PRODUTO	pH	Turbidez (NUT)	Condutividade $\mu\text{S/cm}$	Alcalinidade total $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$	Salinidade mg NaCl / L
Água produzida	8,02	20,4	45,7	528,00	1240,00
Água produzida tratada	7,94	18,50	45,7	-	-
Água tratada saturada com aguarrás do V-400.05	8,15	11,0	45,2	-	-
Água tratada saturada com aguarrás do processo	8,66	18,50	45,7	-	-

Os resultados do teor de nitrogênio amoniacal presente em água destilada saturada nas duas formas de aguarrás fornecidas pela Petrobras constam na Tabela 5.3. Estes resultados servem para orientar a escolha da aguarrás a ser utilizada nos testes de laboratório, bem como dirimir dúvidas quanto à realização das análises de tensão superficial e interfacial com a água saturada com aguarrás proveniente do processo.

Tabela 5.3. Quantidade de nitrogênio amoniacal nos orgânicos estudados.

Produto	Concentração (mg/L)
Água destilada saturada com aguarrás do V-400.05	0,0000
Água destilada saturada com aguarrás do processo	0,3544

Os valores apresentados na Tabela 5.1 mostram que a aguarrás do processo, saturada em água de formação tratada é 23,93% mais viscosa que a aguarrás do vaso V-400.05 nas mesmas condições. Levando-se em consideração esta propriedade conclui-se que é possível utilizar ambos os produtos como extratante, pois haverá durante o processo de saturação da aguarrás com óleo no MDIF um aumento natural de viscosidade.

Quando se observam os valores obtidos para as tensões superficiais e interfaciais, verifica-se que para a água tratada saturada em aguarrás do processo da UPGN-I *não ocorreu uma estabilização dos valores*. Possivelmente, estas

instabilidades decorrem da presença de substâncias de natureza anfífilas, ou seja, substâncias cujas moléculas apresentam um caráter misto polar-apolar. Neste caso, as moléculas na superfície ou na interface, tendem a se orientar com a parte polar dirigida para o meio aquoso e a parte apolar voltada para o meio orgânico ou o ambiente. Tais substâncias agiriam no sistema como agentes tensoativos diminuindo a tensão superficial ou interfacial. A extensão da diminuição da tensão interfacial pode levar, em certos casos, à miscibilidade total entre as fases (RABOCKAI, 1979).

Verificou-se com os técnicos da Petrobras que na UPGN-I ocorreu uma adição de nafta na aguarrás com a finalidade de servir como óleo de absorção para esta unidade. A nafta, como subproduto da coluna de diesel, recebe injeção de **amônia** como neutralizador no topo desta. Esta amônia pode alterar de maneira significativa as propriedades físico-químicas do sistema, em especial, a tensão superficial e interfacial.

Dean (1987) afirma que a **amônia** se dissolve em 90/100 partes de água, sendo também solúvel em solventes orgânicos. A molécula de amônia pode se constituir numa estrutura do tipo dipolo permanente. Na interface água/óleo esta molécula pode se orientar de forma que sua extremidade negativa fique orientada em direção a fase orgânica, enquanto a extremidade positiva direciona-se para a fase aquosa, originando-se assim interações do tipo dipolo-dipolo (ANDREWS e KOKES, 1968).

É possível que, no caso da aguarrás proveniente do processo, a amônia presente atue como um agente tensoativo formando uma monocamada que pode exercer uma pressão expansiva na superfície e/ou interface que vai se opor à tensão normal de contração da interface limpa, como conseqüência pode ocorrer um abaixamento da tensão superficial e/ou interfacial (SHAW, 1975).

Nos resultados das medidas realizadas com água destilada saturada em aguarrás, observou-se a presença de nitrogênio amoniacal na amostra da água saturada em aguarrás do processo da UPGN-I, conforme Tabela 5.3. A aguarrás proveniente do vaso V-400.05 não apresentou nitrogênio amoniacal, o que indica a ausência de amônia. Assim sendo, *esta aguarrás é, sem dúvida, preferível como extratante para utilização no testes de laboratório do MDIF.*

A Tabela 5.4 a seguir resume os resultados das medidas das principais propriedades físico-químicas para o sistema em estudo. As condições operacionais tanto de laboratório como no campo envolvem fases mutuamente saturadas, devido a agitação mecânica imposta ao sistema na câmara de mistura do MDIF. Desta forma, todos os cálculos de extrapolação de escala para o MDIF levarão em conta apenas os resultados da Tabela 5.4 que foram obtidos nesta condição de saturação mútua.

Tabela 5.4: Valores de propriedades físico-químicas, considerados para os diversos cálculos do sistema estudado.

PRODUTO	Densidade(ρ) x 10 ³ kg/m ³	Viscosidade (μ) x 10 ⁻³ Pa.s	Tensão superficial (γ) x 10 ⁻³ N/m	Tensão interfacial (γ) x 10 ⁻³ N/m
Água tratada saturada com aguarrás do V-400.05	1,0022	0,851	70,48	26,50
Aguarrás do V-400.05 saturada com água tratada	0,7429	0,907	25,30	-
Petróleo bruto	0,9204	1.183,950	-	-
QAV saturado com água tratada *	0,7841	0,910	27,14	32,67

* Orgânico disponibilizado para testes de campo, por não haver disponibilidade de aguarrás.

A aguarrás do V-400.05 possui propriedades físico-químicas que possibilitam sua utilização nos testes, sendo este produto indicado para a realização dos experimentos, seja no laboratório ou no campo.

5.2. Laboratório: medida do tamanho da gota transportadora.

Nos ensaios realizados, as variáveis de processo como agitação, relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A) e vazão efetiva na admissão do equipamento foram testadas para verificar suas respectivas influências no diâmetro médio da gota transportadora. A condição comum a todos os testes foi a altura do decantador mantida em 1,0m e o sistema operando sem transferência de massa. Alguns dados do diâmetro médio d_{50} das gotas transportadoras obtidos utilizando-se o sistema capilar e sonda

fotoelétrica e tratados pelo software Hidromess 1.40 estão apresentados na Tabela 5.5 a seguir.

Tabela 5.5 – Diâmetro médio das gotas transportadoras em função da vazão efetiva, relação volumétrica O/A e velocidade de agitação.

Teste	Relação O/A	Vazão efetiva L/h	Velocidade agitação (rpm)	d ₅₀ (mm)
31	1/3	47	Sem agitação	2,70
32	1/3	47	750	2,60
36	1/2	71	750	1,69
37	1/3	71	750	1,60
38	1/6	71	750	1,63
39	1/6	71	Sem agitação	1,70
35	1/3	85	750	1,50
43	2/5	85	Sem agitação	1,80
44	1/5	85	Sem agitação	1,60
45	1/5	85	692	1,80

Comparando-se alguns valores referentes aos testes da tabela anterior, verifica-se que a relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A), bem como a velocidade de agitação na câmara de mistura, não foram fatores que influenciaram significativamente no diâmetro médio das gotas quando mantida constante a vazão efetiva na entrada do equipamento (MDIF). Em contrapartida, a vazão efetiva, para valores distintos, mostrou-se um fator determinante no diâmetro médio das gotas transportadoras de fase orgânica que são formadas ao passar pelo prato perfurado.

Um pequeno diâmetro da gota transportadora proporciona no interior desta um menor tempo de deslocamento pela gota transportada do orgânico, possivelmente resultando em uma melhor separação.

Os testes realizados permitiram uma melhor análise quanto ao diâmetro das gotas transportadoras formadas. Obviamente, em um processo de transferência de massa, a agitação é um fator muito importante já que promove a dispersão entre as fases em estudo.

Os gráficos apresentados na Figura 5.1 comparam os valores dos diâmetros médios (d_{50}) das gotas transportadoras para uma mesma relação O/A e vazão efetiva, em função da presença ou não de agitação na câmara de mistura, de acordo com os testes 31, 32, 38, 39, 44 e 45. Observa-se que, para uma mesma vazão e relação volumétrica O/A não há variação significativa no diâmetro médio da gota gerada. Assim sendo, pode-se afirmar que a variável velocidade de agitação no reator da câmara de mistura não influencia o diâmetro da gota transportadora gerada no prato perfurado. Este fato pode ser explicado pela vazão efetiva passar totalmente pelo furo do prato e ser composto pela soma das vazões do orgânico e do aquoso. Provavelmente, a velocidade de passagem no furo pelo fluido global é que proporciona um menor ou maior diâmetro da gota formada.

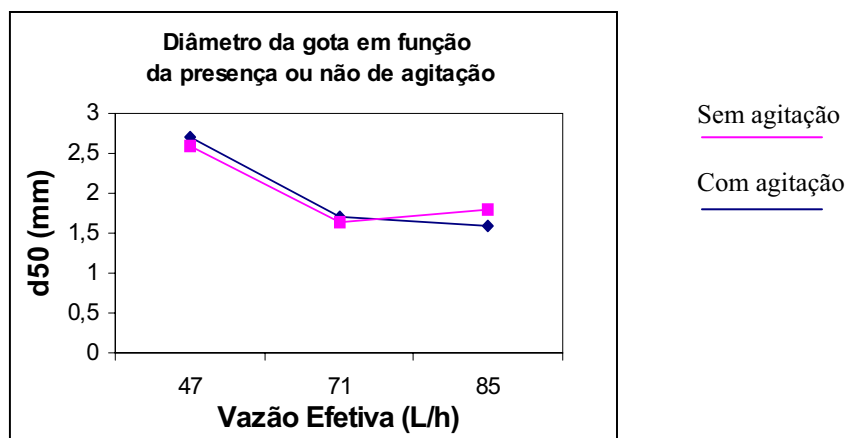


Figura 5.1: Diâmetro da gota transportadora em função da presença de agitação na câmara de mistura.

A Figura 5.2 apresenta a comparação entre os diâmetros médios formados em função da vazão efetiva de entrada do MDIF, mantidas constantes a relação volumétrica O/A e a velocidade de agitação, de acordo com os testes 23, 37 e 35. A análise da Figura 5.2 mostra que a vazão efetiva influencia o diâmetro da gota transportadora gerada no prato perfurado. Verifica-se que o acréscimo na vazão efetiva de 47 para 85 L/h provoca uma diminuição no diâmetro da gota transportadora gerada. Diversos autores têm confirmado este fato e relatam que ele é proporcionado pela rápida passagem da dispersão através dos furos do prato, tendendo a formar gotas mais alongadas, menos esféricas e de baixa reprodutibilidade.

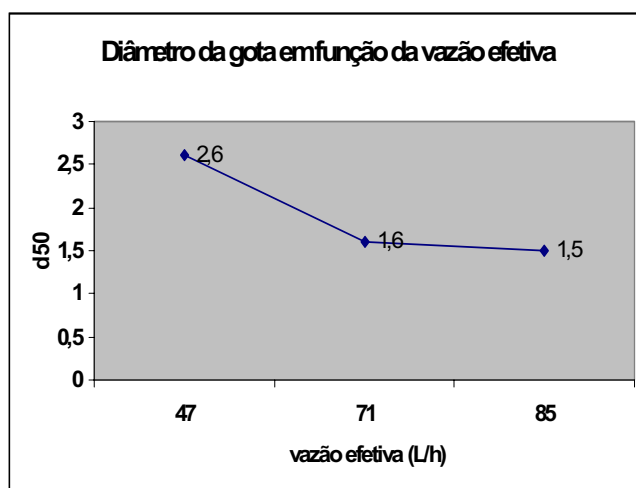


Figura 5.2 – Diâmetro médio da gota transportadora em função da vazão efetiva.

Na Figura 5.3 comparam-se os diâmetros médios formados em função da relação volumétrica O/A, mantidas constantes a vazão efetiva em 71 L/h e a velocidade de agitação em 750rpm, de acordo com os testes 36, 37 e 38. Observa-se que o diâmetro médio da gota transportadora manteve-se praticamente igual quando se variou a relação volumétrica O/A de 1/6 até 1/2. É provável que a velocidade de passagem no furo pelo fluido global não seja influenciada pelo escoamento resultante das proporções diferentes das fases aquosa e orgânica. Desta forma o diâmetro gerado é função da vazão efetiva.

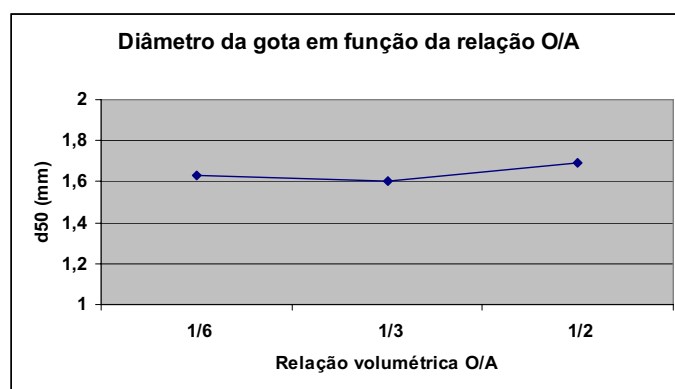


Figura 5.3 – Diâmetro médio da gota transportadora em função da relação O/A.

A técnica utilizada para medição e distribuição das gotas transportadoras de óleo, adotando-se o Hydromess 1.40, mostrou-se bastante satisfatória, com baixos

desvios nas leituras dos diâmetros médios e confiabilidade dos resultados, apresentando boa reprodutividade nos dados obtidos.

Na faixa de vazão estudada (47 a 85 L/h), fatores como razão volumétrica O/A e velocidade de agitação no reator da câmara de mistura não influenciaram de forma significativa no diâmetro médio das gotas transportadoras de óleo quando medidos a uma determinada vazão.

Mantendo-se fixas a vazão efetiva e a relação volumétrica O/A, verificou-se que a presença ou não de agitação no reator, não influenciou de forma significativa o diâmetro da gota gerada no prato perfurado.

O diâmetro médio da gota transportadora mostrou-se bastante influenciado pela vazão efetiva em toda a faixa estudada. O aumento na vazão efetiva provoca uma redução no diâmetro da gota gerada.

5.2.1. Análise hidrodinâmica da medida de gotas.

Nesta etapa, calculam-se os valores do diâmetro médio de Sauter, D_{32} , utilizando-se as Equações de (7) a (12) e comparam-se os resultados com aqueles obtidos experimentalmente. Os valores do D_{32} são apresentados na Tabela 5.6. O orgânico utilizado é a aguarrás saturada em água produzida. Os dados de vazão são os mesmos utilizados nos testes realizados para a medida do tamanho da gota pelo Hidromess 1.40.

Utilizando as Equações (7) e (8) obtém-se o diâmetro médio de Sauter, D_{32} , de 3,0mm para a gota transportadora gerada no início do regime de jato.

A velocidade da gota em um furo do distribuidor (u_N) do equipamento de campo é determinada pela Equação (11). Esta velocidade de passagem para a faixa de vazão estudada (47 a 85 L/h) está entre 0,16 e 0,30m/s.

Adotando-se o critério de Muller (1976) no qual o regime de escoamento abaixo de 0,33m/s é o regime gota-a-gota e para velocidades superiores, considera-se o regime por quebra de jato, observa-se que a coluna operou no regime gota-a-gota. O regime de jato caracterizado por Muller é quase obtido na vazão de 85L/h, onde se considera que o regime é transiente.

O número d'Eötvos (Eö) foi obtido como 0,0959 utilizando a Equação (12).

O diâmetro médio de Sauter, D_{32} , calculado para a gota transportadora gerada após passagem do aquoso carregado em orgânico pelo prato perfurado está expresso na Tabela 5.6. Utilizaram-se as Equações (9), (10) e (11) para este cálculo. Os valores calculados podem ser comparados com os valores medidos d_{50} , tendo como referência a vazão total que circula pelo equipamento. Observa-se para os valores medidos e calculados a mesma tendência de decréscimo no diâmetro da gota transportadora quando se aumenta a vazão efetiva.

Tabela 5.6: Correlação entre o diâmetro calculado D_{32} e o diâmetro medido d_{50} para a gota transportadora.

Q (L/h)	U_N (m/s)	D_{32} (mm)	d_{50} (mm)
			Hidromess 1.40
47	0,1662	3,4	2,60
71	0,2508	3,2	1,72
85	0,3005	3,1	1,67

Verifica-se que a relação entre os diâmetros das gotas geradas no prato perfurado tende a decrescer com o aumento da vazão efetiva total por este. O desvio entre o valor experimental d_{50} e o valor calculado pela literatura D_{32} é da ordem de 24% para a vazão no regime gota-a-gota e de cerca de 46% para o regime transiente.

Conclui-se que as equações adotadas para o cálculo do diâmetro médio de Sauter, D_{32} , obtidas da literatura podem ser representativas para o equipamento de campo onde se opera com o regime gota-a-gota.

5.2. Laboratório: Eficiência de Separação para os testes realizados.

Todos os experimentos com o MDIF foram realizados com réplica, para confrontação dos resultados. Para os testes no ponto central, foram selecionados os de melhor desempenho tanto com relação à operação em si quanto aos resultados das análises. Os resultados dos testes válidos são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados dos testes válidos obtidos para o MDIF-laboratório.

Nº teste	Vazão Total (L/h)	O/A	Agitação (rpm)	Eficiência (%)
1	57	1/5	692	76,10
2	85	1/5	692	45,60
3	57	2/5	692	63,27
4	85	2/5	692	36,38
5	57	1/5	808	52,50
6	85	1/5	808	54,12
7	57	2/5	808	69,28
8	85	2/5	808	65,05
9	47	1/3	750	69,39
10	95	1/3	750	39,40
11	71	1/6	750	51,83
12	71	1/2	750	58,45
13	71	1/3	650	52,88
14	71	1/3	850	68,95
15	71	1/3	750	57,85
16	71	1/3	750	53,25
17	71	1/3	750	54,28
18	71	1/3	750	53,71
19	71	1/3	750	55,29
20	71	1/3	750	52,80

Analisando-se a Tabela 5.7, observa-se que o experimento em que se obteve a melhor eficiência de separação foi o teste 1 com 76,10%, enquanto que o teste 4 apresentou o pior desempenho com 36,38%.

Comparando-se o resultado obtido do teste 4 com o resultado do teste 1 verifica-se que a velocidade de agitação é a mesma, enquanto que a relação O/A é o dobro. Este aumento na relação O/A combinado com o aumento na vazão efetiva total pode ser o fator determinante para a diferença na eficiência de separação.

5.2.1. Análise hidrodinâmica para os testes de laboratório

5.2.1.1. Hidrodinâmica da Câmara de Mistura

Utilizando os dados do planejamento para os testes de laboratório, realizou-se o cálculo do tamanho das gotículas da dispersão primária geradas no reator utilizando a Equação (5) de Coualoglou e Tavlarides (1976) e parâmetros das constantes obtidas por Paulo (1996). Os dados do diâmetro médio de Sauter, d_{32} , para a gotícula gerada são apresentados na Tabela 5.8. Os dados utilizados para o cálculo foram os da fase orgânica aguarrás.

Tabela 5.8: Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gotícula de aguarrás dispersa no reator da câmara de mistura.

Velocidade de agitação rpm; (rps)	Relação volumétrica O/A	d_{32} (μm)
650; (10,833)	1/6	306
	1/5	340
	1/3	470
	2/5	526
	1/2	600
	1/6	284
692; (11,533)	1/5	315
	1/3	436
	2/5	488
	1/2	556
	1/6	258
	1/5	286
750; (12,500)	1/3	396
	2/5	443
	1/2	505
	1/6	235
	1/5	262
	1/3	362
808; (13,467)	2/5	405
	1/2	462
	1/6	221
	1/5	246
	1/3	340
	2/5	381
850; (14,167)	1/2	435

Podem-se fazer correlações entre a velocidade de agitação do misturador da câmara de mistura, a relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A) e o diâmetro médio da gotícula no reator. Observa-se que o diâmetro médio da gotícula do orgânico gerada decresce com o aumento da velocidade de agitação. O decréscimo também é verificado quando se reduz, para uma mesma velocidade de agitação, a relação volumétrica O/A.

Os menores valores de diâmetro da gotícula do orgânico gerada no reator da câmara de mistura ($221\mu\text{m}$) foram obtidos quando se utilizou a menor relação volumétrica O/A (1/6) e a maior velocidade de agitação do misturador (850rpm). Os maiores diâmetros da gota do orgânico gerada ($600\mu\text{m}$) foram verificados quando foi associada a maior relação volumétrica O/A (1/2) e a menor velocidade de agitação (650rpm).

Os valores obtidos estão em concordância com aqueles obtidos por Paulo (1996) para o sistema querosene/água similar ao estudado neste trabalho. O autor obteve diâmetros médios entre 270 e $1.413(\mu\text{m})$.

A Figura 5.4 mostra o diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gotícula gerada no reator da câmara de mistura em função da velocidade de agitação e da relação volumétrica O/A. Observa-se que, para uma mesma relação volumétrica O/A, os diâmetros decrescem à medida que se aumenta a velocidade de agitação no reator. Isto se deve aos fenômenos relacionados ao fracionamento das gotículas que se sobrepõem aos de coalescência. Quanto ao aumento do tamanho da gotícula quando se aumenta a relação volumétrica, é possível que a maior quantidade na mistura da fase dispersa, provoque uma maior coalescência entre as gotas formadas na etapa de fracionamento.

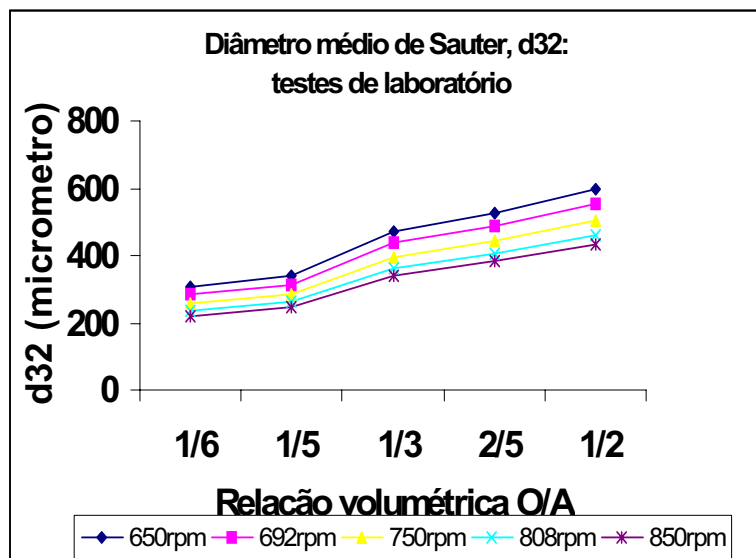


Figura 5.4: Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada no reator da câmara de mistura em função da velocidade de agitação e da relação volumétrica O/A.

5.2.1.2. Hidrodinâmica do prato perfurado

Utilizando-se as Equações (7) e (8) obtém-se o diâmetro médio de Sauter, D_{32} , de 3,0mm para a gota transportadora gerada no início do regime de jato (0,233 m/s).

A velocidade da gota em um furo do distribuidor (u_N) do equipamento de campo é determinada pela equação (11).

Onde:

u_N = velocidade de passagem do fluido por um furo: m/s

Q = vazão total pela área dos furos: $1,31 \times 10^{-5}$ a $2,64 \times 10^{-5}$ m³/s;

N: número total de furos do distribuidor: 100;

d: diâmetro dos furos: 0,0010m.

A velocidade de passagem para a faixa de vazão estudada (47 a 95 L/h) está entre 0,16 e 0,34m/s. Os testes de campo foram realizados em parte no regime gota-a-gota, mas o teste realizado sob a vazão de 95 L/h, segundo o critério adotado por Muller (1976), é caracterizado como operando no regime por quebra de jato.

O número d'Eötvos ($E\ddot{o}$) foi obtido como 0,0959 utilizando a Equação (12).

Os resultados do diâmetro médio de Sauter, D_{32} , para a gota transportadora gerada após passagem do aquoso carregado em orgânico pelo prato perfurado estão expressos na Tabela 5.5. Utilizaram-se as Equações (9), (10) e (11) para este cálculo. Os valores calculados permitem conhecer o diâmetro médio de Sauter, utilizando a expressão de Kumar e Hartland (1982), tendo como referência a vazão total que circula pelo equipamento.

Tabela 5.5: Diâmetro médio de Sauter, D_{32} , gerado no prato perfurado para o sistema estudado Água de formação/ aguarrás em laboratório.

Q (L/h)	U_N (m/s)	D_{32} (mm)
47	0,1662	3,4
57	0,2013	3,3
71	0,2508	3,2
85	0,3005	3,1
95	0,3363	3,0

Observa-se que o aumento da vazão efetiva pelo prato perfurado, para o sistema água de formação/aguarrás, ocasiona um decréscimo no diâmetro médio de Sauter da gota gerada, conforme observado na análise experimental realizada com o Hydromess 1.40.

Verifica-se que o D_{32} calculado para o regime de jato (3,0mm) é o mesmo obtido pela correlação de Kumar e Hartland (1982) quando a velocidade em um furo do prato perfurado é de 0,34m/s. Este valor é similar àquele proposto por Muller (1976), para a velocidade de início da condição de jato.

5.2.1.3. Hidrodinâmica da câmara de decantação para o teste de laboratório

A Tabela 5.6 apresenta os resultados da velocidade descendente da gota transportadora no meio orgânico da câmara de decantação, quando aplicadas as Equações (1) e (8) aos testes do equipamento de laboratório. Verifica-se que a velocidade da gota transportadora é função do diâmetro médio da gota. À medida que o diâmetro médio da gota transportadora diminui, também é reduzida a velocidade de

deslocamento das gotas (fase dispersa). Observa-se que um decréscimo de 0,4mm (12%) no diâmetro da gota ocasiona uma redução de 39,7 cm/s (22,2%) na velocidade de deslocamento da gota transportadora.

Tabela 5.6: Velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa) em função do D_{32} .

Q (L/h)	D_{32} (mm)	U_d (cm/s)
47	3,4	179,34
57	3,3	168,94
71	3,2	158,86
85	3,1	149,09
95	3,0	139,62

A Tabela 5.7 apresenta os resultados da velocidade resultante entre a gota transportadora e o meio orgânico da câmara de decantação. Mostra-se também a diferença entre os tempos de residência das gotas para os testes com o equipamento de laboratório. Nota-se que a velocidade da gota transportadora é função do diâmetro médio da gota. Quanto maior o diâmetro, maior a velocidade de deslocamento.

Verifica-se nestes testes de laboratório a insignificante contribuição que proporciona a velocidade ascendente da fase orgânica, para a redução da velocidade da gota transportadora e do tempo de residência da gota no interior da câmara de decantação. A contribuição das linhas de corrente na redução da velocidade de queda da gota não é abordada neste trabalho.

Para uma mesma vazão a quantidade de orgânico na relação O/A pouco contribui para o aumento do tempo de residência da gota transportadora.

O tempo de ascensão da gota de orgânico no interior da gota transportadora t_d é função do diâmetro médio de Sauter d_{32} obtido no reator da câmara de mistura e do diâmetro médio de Sauter D_{32} gerado no prato perfurado, sendo este último o meio contínuo, enquanto que a gota do orgânico é o meio disperso.

Tabela 5.7: Velocidade resultante e tempo de deslocamento das gotas transportadoras e gotículas transportadas.

Q _L (L/h)	Relação volume O/A	U _c (cm/s)	U _d (cm/s)	U _r (cm/s)	t _r (s)	t _d (s)	t _r – t _d (s)
47	1/6	0,04		179,30		0,22	0,90
	1/5	0,05		179,29		0,18	0,94
	1/3	0,08	179,34	179,26	1,12	0,09	1,03
	2/5	0,09		179,25		0,07	1,05
	1/2	0,10		179,24		0,06	1,06
57	1/6	0,05		168,89		0,25	0,93
	1/5	0,06		168,88		0,20	0,98
	1/3	0,09	168,94	168,85	1,18	0,10	1,08
	2/5	0,11		168,83		0,08	1,10
	1/2	0,13		168,81		0,06	1,12
71	1/6	0,07		158,79		0,29	0,97
	1/5	0,08		158,78		0,24	1,02
	1/3	0,12	158,86	158,74	1,26	0,12	1,14
	2/5	0,13		158,73		0,10	1,16
	1/2	0,16		158,70		0,08	1,18
85	1/6	0,08		149,01		0,34	1,00
	1/5	0,09		149,00		0,27	1,07
	1/3	0,14	149,09	148,95	1,34	0,14	0,98
	2/5	0,16		148,93		0,11	1,23
	1/2	0,19		148,90		0,09	1,25
95	1/6	0,09		139,53		0,37	1,06
	1/5	0,10		139,52		0,30	1,13
	1/3	0,16	139,62	139,46	1,43	0,16	1,27
	2/5	0,18		139,44		0,12	1,31
	1/2	0,21		139,41		0,10	1,33

Verifica-se que, para todos os ensaios em laboratório, o tempo de residência foi maior que o tempo de ascensão da gotícula transportada. Desta forma, segundo o modelo translacional de Stokes, todas as gotículas de orgânico que estivessem no

interior das gotas transportadoras, teriam atingido a interface e, depois de rompido o filme interfacial, migrado para a sua homofase. Assim sendo, os valores do teor de óleos e Graxas (TOG) nas análises da água tratada na saída do equipamento resultariam em zero. Este fato geralmente não ocorre na prática e os testes apresentam uma eficiência de separação menor que 100%.

Esta condição leva a supor que os modelos que consideram os movimentos rotacionais e vibracionais da gotícula do orgânico no interior da gota transportadora podem se aproximar mais da realidade da hidrodinâmica do MDIF (Paulo, 1996).

O cálculo da retenção da fase aquosa na câmara de decantação na condição de máxima vazão do aquoso (β_e), utilizando a Equação (17), resultou em um valor de 0,44. Este dado está dentro do especificado por Perrut e Loutaty (1972) para coluna a pulverização, antes de atingir a condição de inundação (flooding). Da mesma forma que no laboratório, os dados para os testes de campo utilizam os mesmos valores de relação volumétrica O/A, portanto esta também deve ser a condição de inundação para o equipamento de campo.

5.2.2. Análise estatística para os testes de laboratório

5.2.2.1. Análise de significância estatística para as variáveis independentes

Os dados da Tabela 5.8 apresentam as variáveis independentes que tem maior significância estatística e obedecem, basicamente, aos valores do teste F e do método do valor P para um fator. Sabe-se que para valores de $MQ_R / MQ_T > F_{1,n-p}$ tabelado (neste caso $F_{1,10}$ tabelado é igual a 4,96, ver Anexo 2), os fatores serão estatisticamente significantes. Para valores de $P < 0,01$ estes fatores terão elevada significância estatística. Para valores de P no intervalo entre 0,01 e 0,05, inclusive, os fatores serão estatisticamente significantes.

Tabela 5.8. Fatores de elevada significância estatística e estatisticamente significantes obtidos no planejamento experimental do MDIF - laboratório.

Fatores	Distribuição F	Fator P
Vazão volumétrica total (X_{vaz}) (L)	148,310	0,0000
Agitação na câmara de mistura (X_{agit}) (L)	26,437	0,0004
Agitação na câmara de mistura (X_{agit}) (Q)	14,167	0,0037
Interação entre a relação O/A x Agitação mistura ($X_{rel} \cdot X_{agit}$)	51,400	0,0000
Interação entre a agitação mistura x vazão efetiva total ($X_{agit} \cdot X_{vaz}$)	62,294	0,0000

Observa-se pela Tabela 5.8 que das variáveis estudadas a interação entre a *vazão efetiva e a velocidade de agitação*, bem como entre *a relação O/A e a velocidade de agitação* possuem elevada significância estatística. Além destas interações, *a vazão total (linear) e a velocidade de agitação (linear e quadrática)* também apresentam elevada significância estatística. Ressalte-se que a variável *Relação O/A* apresentou ser não estatisticamente significativa quando isolada, mas ao interagir com *a vazão total ou a velocidade de agitação* apresentou-se de elevada significância estatística.

5.2.2.2. Equação do Modelo para o MDIF-laboratório

A partir dos dados obtidos com os experimentos alimentou-se o programa Statistica-Experimental Design para a obtenção de um modelo empírico capaz de prever a eficiência de separação para o aparelho, dentro do intervalo de estudo para as três variáveis trabalhadas.

Utilizou-se o programa Statistica e simularam-se alguns dados de artigos de outros autores que utilizaram o planejamento experimental do tipo central composto (Anexo 4). Verificou-se que o programa Statistica eliminou os coeficientes de regressão de ordem 3 e superiores além de alguns de ordem 2. Para aqueles coeficientes de regressão não eliminados, mas que podem ser utilizados na equação do modelo, realizou-se um comparativo por fator, com valores $P > 0,05$. Verificou-se que os valores dos coeficientes de regressão, para a equação do modelo gerado para o MDIF, situa-se entre a faixa utilizada por estes autores, **permitindo-se utilizar todos os coeficientes apresentados** na Análise de variância (ANOVA) pelo Statistica. O programa gerou o seguinte modelo, representado pela Equação (26).

$$E = 54,503 - 8,086X_{vaz} + 0,128X_{vaz}^2 + 1,229X_{rel} + 0,391X_{rel}^2 + 3,414X_{agit} + 2,432X_{agit}^2 - 0,280X_{vaz}X_{rel} + 6,847X_{agit}X_{vaz} + 6,220X_{agit}X_{rel} \quad (26)$$

A Equação (26) do modelo gerado é válida para o intervalo definido, ou seja, para as variáveis X_{rel} , X_{vaz} e X_{agit} no intervalo codificado de -1,682 a 1,682. Utiliza-se a Equação (26) com valores codificados para as variáveis independentes ou interações entre variáveis, enquanto que a variável resposta eficiência de separação é dada em percentagem (%). Faz-se uma análise da equação do modelo gerado pelo programa Statistica com os dados dos testes do planejamento experimental. Os coeficientes foram obtidos da tabela de Coeficientes de Regressão do programa Statistica Experimental Design. São 10 os coeficientes das variáveis independentes, sendo que um coeficiente é independente, enquanto que os 9 restantes são valores dos coeficientes de Regressão.

Observa-se que os coeficientes da regressão possuem valores que contribuem positivamente ou negativamente. Em determinados casos, para uma contribuição positiva linear segue-se uma contribuição negativa quadrática, ou ao contrário. Para as variáveis independentes *relação O/A* e *velocidade de agitação* os dois valores contribuem positivamente. A interação $X_{vaz}X_{rel}$ contribui de forma negativa para a eficiência, enquanto que as interações $X_{vaz}X_{agit}$, $X_{rel}X_{agit}$, contribuem de forma positiva para eficiência de separação.

5.2.2.3. Análise da variância do modelo Estatístico.

De acordo com a Tabela 5.9, o coeficiente de correlação entre as respostas observadas e os valores preditos pelo modelo estatístico de segunda ordem, ajustado para a eficiência de separação do MDIF, é de 0,96838. A variação em torno da média é explicada por 96,83%, ou seja, igual ao valor máximo explicável. Com relação ao teste F, verifica-se que o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos dados obtidos pela equação. Observa-se que o valor F é 6,86 vezes o valor do F tabelado de 4,96 (anexo 2), a um nível de confiança de 95%, demonstrando que a equação ajustada além de estatisticamente significativa é útil para fins preditivos, segundo Box; Hunter; Hunter (1978). A variação em torno da média devida aos resíduos é explicada pelo erro

puro e pela pequena evidência da falta de ajuste, apresentando um bom ajuste do modelo.

Tabela 5.9. Análise de variância para o ajuste do modelo para o MDIF-laboratório.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Número de graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	1844,022	9	204,8913
Resíduos	60,215	10	6,0215
Falta de ajuste	43,249	5	8,649
Erro puro	16,966	5	3,3932
Total	1904,237	19	

% de variação explicada: 96,83
 $F_{\text{calculado}} = MQ_R/MQ_r : 34,02$
 $F_{\text{tabelado}} (95\%): 4,96$
 $F_{\text{calculado}} / F_{\text{tabelado}}: 6,86$

A Figura 5.5 apresenta a boa concordância do modelo empírico quando comparado aos valores observados. Observam-se pequenos desvios em relação aos valores observados, demonstrando o bom ajuste do modelo para a eficiência de separação do MDIF.

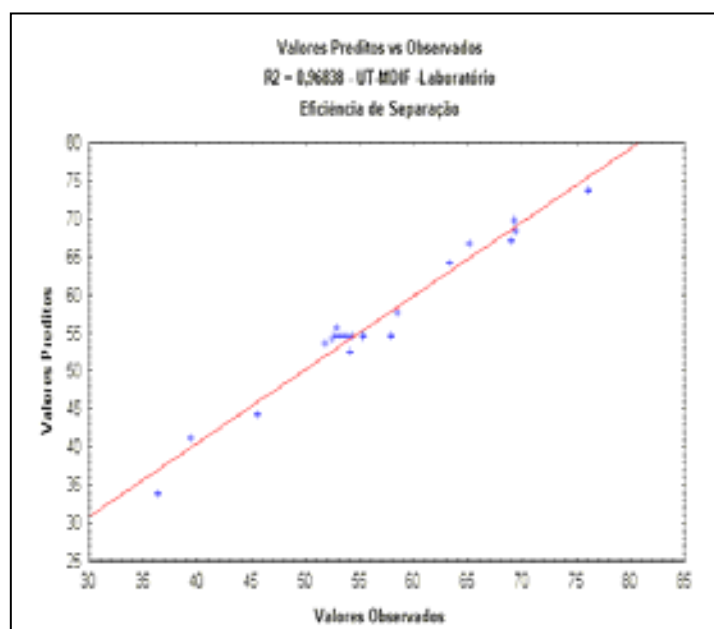


Figura 5.5. Valores preditos em relação aos valores observados nos testes para a eficiência de separação do MDIF - laboratório.

5.2.3. Análise das Superfícies de Resposta.

Apresenta-se a seguir a análise das várias superfícies de resposta geradas pelo programa Statistica-Experimental Design com base na variável dependente *eficiência de separação* do MDIF. A variável *relação O/A* quando isolada apresentou-se não estatisticamente significativa, mas quando interagiu com as demais variáveis resultou em estatisticamente significativa ou de elevada significância estatística. Por esta razão optou-se em apresentar as superfícies de resposta com base na variável *relação O/A*, variando-a em toda a faixa estudada. Nas Figuras 5.6 a 5.10 a *relação O/A* cresce de 1/6 a 1/2.

Verifica-se que a medida que ocorre o incremento da *relação O/A*, ocorre o decréscimo do valor de menor eficiência de separação (representada pela região verde) na faixa de 42,1 a 5,6%. Para a região de maior eficiência (representada pela região vermelha) ocorre o mesmo, ou seja, um decréscimo que varia de 96 a 70%, mas que volta a crescer para 75% quando se atinge a *relação* de 1/2. Observa-se também que a área de maior eficiência cresce não só numericamente, mas superficialmente, expandindo-se para uma região maior para a própria *relação O/A*.

Os melhores desempenhos do equipamento são observados em duas condições distintas: a primeira ocorre para baixas *relações O/A* (1/6 e 1/5) onde os maiores valores de eficiência estão localizados na área de baixa agitação (<700 rpm) e baixa vazão (<57L/h). A segunda se observa quando se tem altas *relações O/A* (1/2), onde a eficiência de separação, próxima dos 100%, é obtida para alta agitação (850 rpm) e a partir de 57L/h.

Na condição de baixa *relação O/A* é possível que, mesmo para pequenas velocidades de agitação, o distanciamento das gotas não possibilite uma boa aproximação no reator dificultando a coalescência. Este efeito pode ser compensado pelo maior tempo de residência no misturador provocando o aparecimento de gotículas maiores e de mais fácil separação na câmara de decantação.

Para altas relações O/A é provável que as gotas transportadoras formadas possuam um diâmetro menor que favoreça a liberação das gotículas do seu interior, mesmo estas possuindo um menor diâmetro ocasionado pela maior velocidade de agitação.

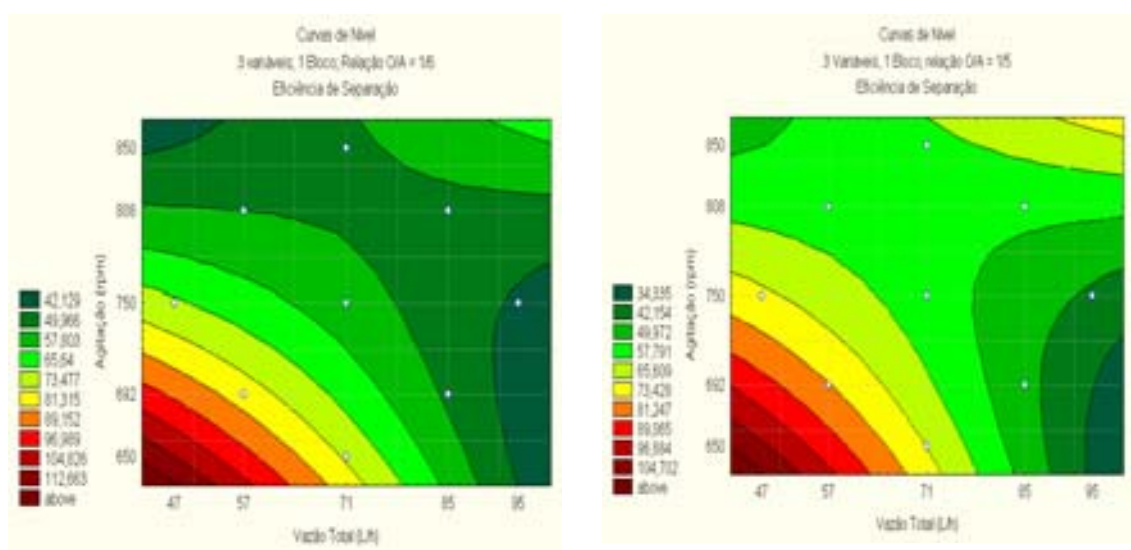


Figura 5.6 e 5.7. Curvas de Nível para a eficiência de separação do MDIF, com a combinação das variáveis *vazão total* e *velocidade de agitação na câmara de mistura* ($X_{rel} = 1/6$ e $1/5$).

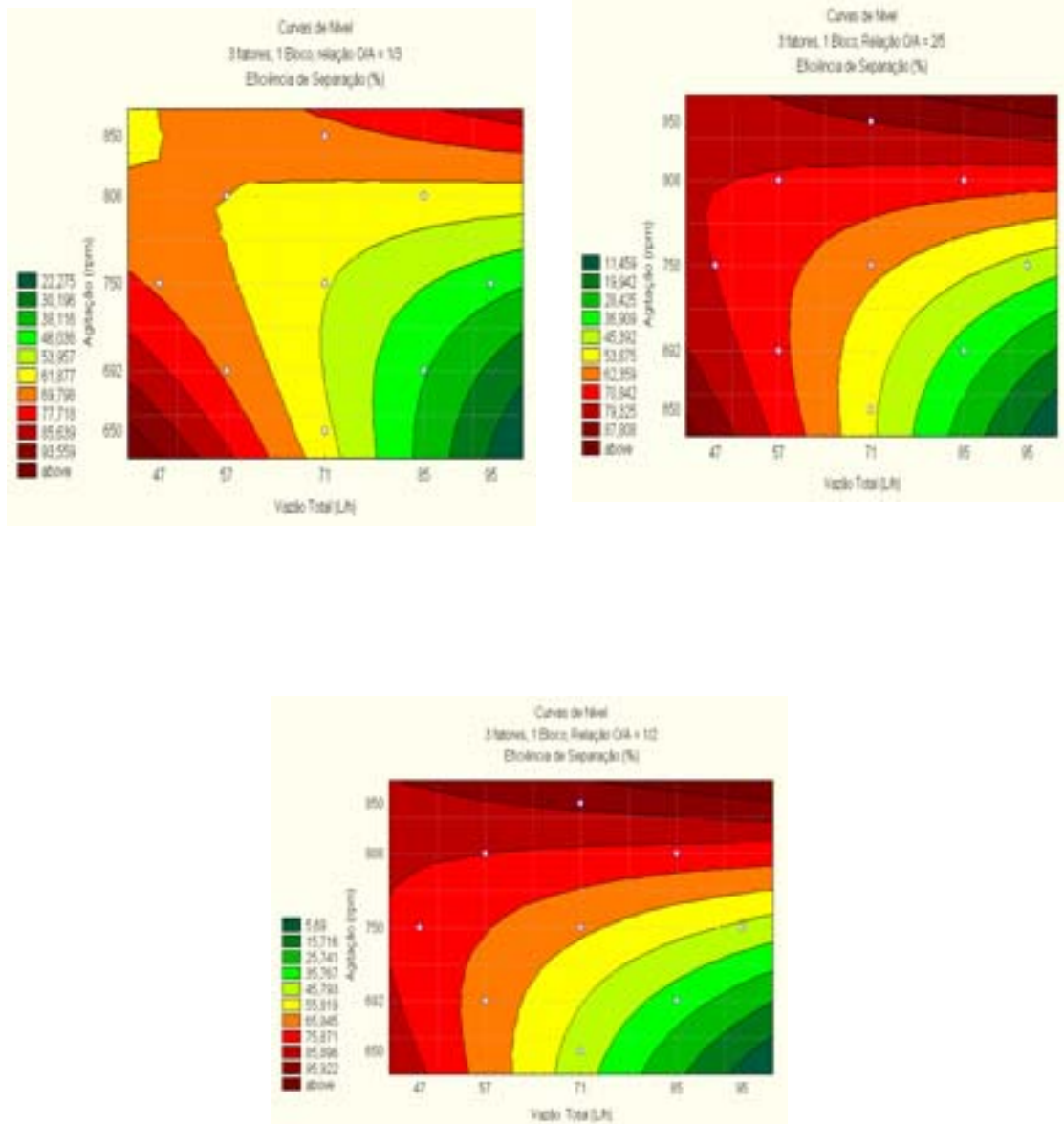


Figura 5.8, 5.9 e 5.10. Curvas de Nível para a eficiência de separação do MDIF, com a combinação das variáveis: vazão total e velocidade de agitação na câmara de mistura ($X_{rel} = 1/3, 2/5$ e $1/2$)

5.3. Testes de campo com a UT-MDIF.

A operação e testes de campo do processo envolvido na UT-MDIF deverão ser elaboradas em duas etapas, assim definidas:

- a) Analisa-se a hidrodinâmica do equipamento no campo;
- b) Realiza-se o planejamento estatístico experimental do tipo fatorial completo para as principais variáveis de processo;
- c) Operacionaliza-se o protótipo e coleta-se os dados necessários à análise do processo. Após a análise das curvas de tendência, desloca-se o planejamento estatístico para a área de maior eficiência onde serão realizados novos testes e modelado o processo do protótipo, gerando a nova equação do modelo para a área de interesse.

5.3.1. Hidrodinâmica do Equipamento de campo

5.3.1.1 Hidrodinâmica da Câmara de Mistura

Utilizando os dados do planejamento para os testes de campo, realizou-se o cálculo do tamanho das gotas da dispersão primária geradas no reator utilizando a Equação (5) de Coualoglou e Tavlarides (1976) e parâmetros das constantes obtidas por Paulo (1996). Os dados do diâmetro médio de Sauter, d_{32} , para a gota gerada são apresentados na Tabela 5.10. Os dados utilizados para cálculo foram o do orgânico QAV, disponibilizado pela Petrobras devido problemas no abastecimento da aguarrás.

Tabela 5.10: Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada de QAV disperso no reator da câmara de mistura.

Velocidade de agitação rpm; (rps)	Relação volumétrica O/A	d_{32} (μm)
78; (1,3000)	1/6	806
	1/5	883
	1/3	1245
	2/5	1392
	1/2	1587
83; 1,3833	1/6	733
	1/5	821
	1/3	1132
	2/5	1265
	1/2	1443
90; 1,5000	1/6	681
	1/5	764
	1/3	1053
	2/5	1177
	1/2	1342
97; 1,6167	1/6	612
	1/5	686
	1/3	945
	2/5	1056
	1/2	1205
102; 1,7000	1/6	585
	1/5	656
	1/3	904
	2/5	1010
	1/2	1152

Fazem-se correlações entre a velocidade de agitação do misturador da câmara de mistura e a relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A). Observa-se que o diâmetro médio da gota do orgânico gerada decresce com o aumento da velocidade de agitação. O decréscimo também é verificado quando se reduz, para uma mesma velocidade de agitação, a relação volumétrica O/A.

Os menores valores de diâmetro da gota do orgânico gerada no reator da câmara de mistura ($585\mu\text{m}$) foram obtidos quando se utilizou a menor relação O/A (1/6) e a maior velocidade de agitação do misturador (102rpm). Os maiores diâmetros da gota do orgânico gerada ($1.587\mu\text{m}$) foram verificados quando foi associada a maior relação volumétrica O/A (1/2) e a menor velocidade de agitação (78rpm).

Menores diâmetros da gota gerada possibilitam uma melhor extração do óleo do interior do meio aquoso, pois aumentam a área interfacial de contato. Por outro lado, podem dificultar a separação na câmara de decantação do MDIF. Os valores obtidos estão em concordância com aqueles obtidos por Paulo (1996) para o sistema querosene/água similar ao estudado neste trabalho.

A Figura 5.11 mostra o diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada de QAV no interior do reator da câmara de mistura em função da velocidade de agitação e da relação volumétrica O/A. Os valores foram obtidos da Tabela 5.10.

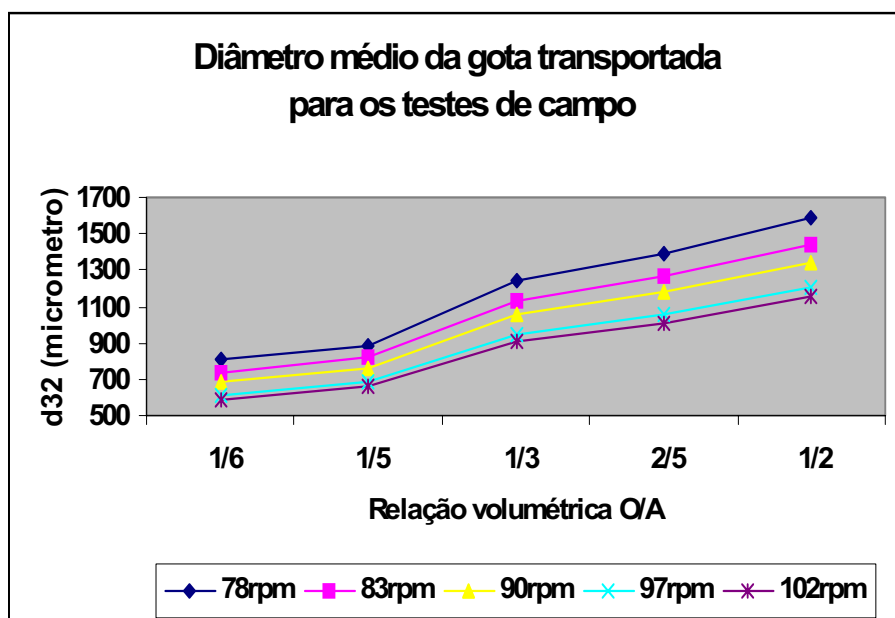


Figura 5.11: Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , da gota gerada no reator da câmara de mistura em função da velocidade de agitação e da relação volumétrica O/A.

5.3.1.2. Hidrodinâmica do prato perfurado

Utilizando as Equações (7) e (8) obtém-se o diâmetro médio de Sauter, D_{32} , de 3,6mm para a gota transportadora gerada no início do regime de jato (0,233 m/s).

A velocidade da gota em um furo do distribuidor (u_N) do equipamento de campo é determinada pela equação (11).

Onde dispomos dos seguintes dados para uso da equação (11) :

U_N = velocidade de passagem do fluido por um furo: m/s

Q = vazão total pela área dos furos: 0,0018 a 0,0037 m³/s;

N: número total de furos do distribuidor: 10.057;

d: diâmetro dos furos: 0,0012m.

A velocidade de passagem do fluido por um furo do prato perfurado para a faixa de vazão estudada (6,6 a 13,4 m³/h) está entre 0,16 e 0,33m/s.

O número d'Eötvos (Eö) foi calculado em 0,0942 utilizando a Equação (12).

Os resultados do diâmetro médio de Sauter, D_{32} , para a gota transportadora gerada após passagem do aquoso carregado em orgânico pelo prato perfurado estão expressos na Tabela 5.11. Utilizaram-se as Equações (9), (10) e (11) para este cálculo. Os valores calculados permitem conhecer o diâmetro médio de Sauter, utilizando a expressão de Kumar e Hartland (1982), tendo como referência a vazão total que circula pelo equipamento.

Tabela 5.11: Diâmetro médio de Sauter, D_{32} , gerado no prato perfurado para o sistema estudado Água de formação/ QAV.

Q (m ³ /h)	U_N (m/s)	D_{32} (mm)
6,6	0,16	4,1
8,0	0,19	4,0
10,0	0,25	3,9
12,0	0,29	3,8
13,4	0,33	3,7

Observa-se que o diâmetro da gota gerada decresce com o aumento da vazão pelo prato perfurado. Para um aumento de 103% na vazão ocorre um decréscimo de 9,8% no diâmetro da gota gerada.

É possível que a não linearidade do decréscimo da gota em relação a acréscimo da vazão se observe pela proximidade da região de jato, visto que o diâmetro de Sauter D_{32} de 3,6mm proposto por Scheele e Meister (1968) para a velocidade de início de jato,

situa-se próximo a velocidade de 0,33 m/s quando calculado por Kumar e Hartland (1982). Este resultado da velocidade de jato concorda com a velocidade de início de jato para sistemas líquido-líquido similares àqueles propostos por Muller (1976) que é de 0,33m/s.

Desta forma, verifica-se que o regime de jato para o sistema QAV/água de formação para o equipamento de campo terá início a partir de vazões efetivas de 13,4m³/h. Assim sendo, conclui-se que o sistema opera no regime gota-a-gota e intermediário até a velocidade aproximada de 13,0 m³/h e acima desta no regime de jato.

Observa-se que o diâmetro de 1,0mm do furo no prato perfurado, previsto na extrapolação de escala, não pode ser confeccionado por motivos de utilização de material, sendo realizado um acréscimo no diâmetro para 1,2mm. Quando utilizamos as mesmas equações para o cálculo do diâmetro do furo extrapolado, verificamos que o diâmetro médio de Sauter, D_{32} , para a gota gerada estaria entre 3,4 e 3,8mm para a faixa estudada de vazão. Este parâmetro reduz em 8% o diâmetro da gota transportadora gerada no prato perfurado.

5.3.1.3. Hidrodinâmica da câmara de decantação

A Tabela 5.12 apresenta os resultados da velocidade descendente da gota transportadora no meio orgânico da câmara de decantação, quando aplicadas as Equações (1) e (8) aos testes do equipamento de campo. Verifica-se que a velocidade da gota transportadora é função do diâmetro médio da gota. À medida que o diâmetro médio da gota transportadora diminui, também é reduzida a velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa). Observa-se que um decréscimo de 0,4mm (10%) no diâmetro da gota ocasiona uma redução de 49,1 cm/s (22,8%) na velocidade de deslocamento da gota transportadora.

Tabela 5.12: Velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa) em função do D_{32} .

Q (m ³ /h)	D ₃₂ (mm)	U _d (cm/s)
6,6	4,1	264,99
8,0	4,0	252,23
10,0	3,9	239,77
12,0	3,8	227,63
13,4	3,7	215,81

A Tabela 5.13 apresenta os resultados da velocidade ascendente da fase orgânica e da velocidade relativa da gota transportadora no meio orgânico da câmara de decantação, quando aplicadas as Equações (7) a (12) aos testes do equipamento de campo. Verifica-se que a velocidade da gota transportadora é função do diâmetro médio desta.

Verifica-se nestes testes de campo que a velocidade ascendente da fase orgânica pouco contribui para a redução da velocidade resultante da gota transportadora e do tempo de residência da gota no interior da câmara de decantação. A contribuição do fenômeno das linhas de corrente na redução da velocidade de queda não é tratada neste trabalho.

Observa-se que o tempo de residência no interior da câmara de decantação é bastante influenciado pela vazão efetiva total, bem como pelo diâmetro da gota transportadora. O acréscimo na vazão efetiva contribui para o acréscimo do tempo de residência no interior do decantador. Quanto maior o tempo de residência, maior é a possibilidade da gotícula transportada migrar até a interface e romper o filme líquido, coalescendo na sua homofase. Quanto maior o número de gotículas transportadas que saem do interior da gota transportadora, menos orgânico é carregado para a base da câmara e, desta forma, melhor é o tratamento e melhor é a eficiência de separação.

Tabela 5.13: Velocidade de deslocamento das gotas (fase dispersa) e o tempo de residência desta na câmara de decantação.

Q_L (m^3/h)	Relação volumétrica O/A	Q_o (m^3/h) (orgânico)	U_c (cm/s)	U_d (cm/s)	U_r (cm/s)	T_r (s)
6,6	1/6	0,94	0,09		264,90	0,75
	1/5	1,1	0,11		264,89	0,75
	1/3	1,65	0,16	264,99	264,83	0,75
	2/5	1,89	0,19		264,81	0,75
	1/2	2,2	0,22		264,78	0,75
8,0	1/6	1,14	0,11		252,11	0,79
	1/5	1,33	0,13		252,09	0,79
	1/3	2,00	0,20	252,23	252,03	0,79
	2/5	2,29	0,22		252,00	0,79
	1/2	2,67	0,26		251,92	0,79
10,0	1/6	1,43	0,14		239,63	0,83
	1/5	1,67	0,16		239,61	0,83
	1/3	2,50	0,25	239,77	239,53	0,83
	2/5	2,86	0,28		239,49	0,83
	1/2	3,33	0,33		239,44	0,83
12,0	1/6	1,71	0,17		227,47	0,88
	1/5	2,00	0,20		227,44	0,88
	1/3	3,00	0,29	227,63	227,34	0,88
	2/5	3,43	0,34		227,30	0,88
	1/2	4,00	0,39		227,24	0,88
13,4	1/6	1,91	0,19		215,62	0,93
	1/5	2,23	0,22		215,59	0,93
	1/3	3,35	0,33	215,81	215,48	0,93
	2/5	3,83	0,38		215,43	0,93
	1/2	4,47	0,44		215,37	0,93

Para a faixa estudada, o aumento da vazão efetiva de 6,6 m³/h para 13,4m³/h, implica em um decréscimo de 0,4mm (10%) no diâmetro da gota transportadora e um aumento de 0,2s (21,7%) no tempo de residência da gota no interior da câmara de decantação.

Para uma mesma vazão a quantidade de orgânico na relação O/A pouco contribui para o aumento do tempo de residência da gota transportadora.

5.3.2. Planejamento estatístico experimental para os testes de campo

O sistema é caracterizado pelo escoamento bifásico entre duas fases líquidas. A partir do prato perfurado, quando ocorre a inversão de fases em relação ao sistema alimentado originalmente, tem-se a presença de uma dupla emulsão, a saber orgânico/água/orgânico. Os fenômenos de coalescência das gotículas transportadas entre si no interior da gota transportadora que está se deslocando para a interface de separação, assume grande complexidade. Algumas tentativas foram feitas, simplificando o fenômeno para apenas uma gotícula transportada no interior da gota transportadora. Nesta situação, admitiu-se que a gotícula transportada teria apenas um movimento de translação, observou-se que o modelo não descreveu o fenômeno de forma satisfatória. É bem possível, que o movimento da gota transportada não seja apenas de translação, mas que ela descreva um movimento combinado translação-rotação, o que torna ainda mais complexo o modelo fenomenológico, Paulo (1996).

Pelo exposto optou-se por utilizar a modelagem estatística baseada no planejamento estatístico experimental.

O planejamento estatístico experimental aplicado ao equipamento de campo é o mesmo que foi aplicado ao equipamento em laboratório (item 4.1.2.2.5). Este se deve ao fato da utilização dos dados obtidos em laboratório para a realização da extrapolação de escala. A relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A), a vazão específica (m³/m²h) e a velocidade periférica do misturador (m/s) são as mesmas para os testes de laboratório e para os ensaios no protótipo de campo.

O planejamento central composto é do tipo fatorial completo com seis experimentos no ponto central e ampliação do tipo estrela. São realizados vinte testes válidos para a introdução dos dados no software Statistica.

No planejamento foram analisadas três variáveis independentes que influenciam na eficiência de separação do MDIF: vazão efetiva; relação volumétrica orgânico/aquoso (O/A) e velocidade de agitação na câmara de mistura. A altura da câmara de decantação em 2,0 m e a concentração de óleo na alimentação do equipamento que variou na faixa de 30 a 50 ppm foram mantidas constantes. Não se tem controle sobre a composição de entrada da água produzida, pois a mesma era oriunda do sistema de tratamento de efluentes em operação contínua. O software *Statistica Experimental Design* versão 5.5 foi utilizado para o tratamento dos resultados obtidos. Os valores reais e codificados estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Valores reais e respectivos valores codificados para as variáveis independentes do planejamento experimental do equipamento de campo.

Valores reais das variáveis independentes			
Valores codificados	Relação	Vazão Efetiva (m ³ /h)	Velocidade de
	Volumétrica O/A	[específica m ³ m ⁻² h ⁻¹]	Agitação (rpm)
	X _{rel}	X _{vaz}	[veloc. periférica m/s]
			X _{agit}
-1,682	1/6	6,6 - [23,3]	78 [1,02]
-1	1/5	8,0 - [28,3]	83 [1,10]
0	1/3	10,0 - [35,4]	90 [1,18]
1	2/5	12,0 - [42,5]	97 [1,27]
1,682	1/2	13,4 - [47,4]	102 [1,34]

5.3.2.1. Resultados e discussão específicos dos testes de campo da UT-MDIF

Todos os experimentos com o MDIF foram realizados em réplica, para confirmação dos resultados. As Tabelas 5.15 e 5.16 apresentam os resultados das análises de concentração de óleo em água na entrada e na saída da UT-MDIF, respectivamente.

Tabela 5.15: Valores das concentrações de óleo em água na entrada da UT-MDIF.

Testes	Concentração na entrada (ppm)
6, 14, 7, 19, 9, 5, 17	38
16, 13, 1,	39
3, 12, 11, 18, 15, 8, 4	32
2, 20, 10,	51

Tabela 5.16: Valores das concentrações de óleo em água na saída da UT-MDIF.

Testes	Concentração na saída (ppm)
6, 16, 3, 14, 2, 19, 12,	
11, 13, 18, 15, 20, 8*, 10,	<20
17, 4*,	
7, 9, 5, 1,	>20

* apresentaram resultados < 10ppm.

Os resultados de eficiência de separação dos testes válidos são apresentados na Tabela 5.17. Analisando-se esta tabela, observa-se que o teste em que se obteve a maior eficiência de separação foi o teste 8 com 80,95% (120% da carga nominal do equipamento), enquanto que o teste 9 teve o menor desempenho com 19,92% (66% da carga nominal do equipamento). Comparando-se os resultados, observa-se que um aumento na vazão efetiva total, bem como no volume de solvente orgânico são fatores determinantes para o aumento na eficiência de separação.

Tabela 5.17: Resultados dos testes de campo válidos obtidos dos testes da UT-MDIF.

Número Teste	Vazão Efetiva (m ³ /h)	Relação volumétrica O/A	Velocidade de Agitação (rpm)	Eficiência de Separação (%)
1	8,0	1/5	83	28,43
2	12,0	1/5	83	68,21
3	8,0	2/5	83	46,96
4	12,0	2/5	83	71,25
5	8,0	1/5	97	28,03
6	12,0	1/5	97	66,87
7	8,0	2/5	97	46,71
8	12,0	2/5	97	80,95
9	6,6	1/3	90	19,92
10	13,4	1/3	90	74,53
11	10,0	1/6	90	63,32
12	10,0	½	90	59,69
13	10,0	1/3	78	49,90
14	10,0	1/3	102	54,72
15	10,0	1/3	90	56,06
16	10,0	1/3	90	61,84
17	10,0	1/3	90	67,29
18	10,0	1/3	90	58,49
19	10,0	1/3	90	68,78
20	10,0	1/3	90	68,90

5.3.3. Análise hidrodinâmica para a eficiência de separação dos testes de campo

Na Tabela 5.18 correlacionam-se os valores dos testes de campo das variáveis independentes que mais influenciam a eficiência de extração do MDIF com os resultados obtidos com as correlações da hidrodinâmica. Desta forma, relacionam-se a seguir os parâmetros hidrodinâmicos que mais influenciam os resultados da eficiência de separação nas respectivas etapas do equipamento, quais sejam: o reator do misturador, o prato perfurado e a câmara de decantação:

- a) Diâmetro médio de Sauter, d_{32} , para a gotícula transportada gerada no reator da câmara de mistura: velocidade de agitação e relação volumétrica O/A;
- b) Diâmetro médio de Sauter, D_{32} , para a gota transportadora gerada no prato perfurado: vazão efetiva total;
- c) Tempo de residência da gota transportadora no interior da câmara de decantação: vazão efetiva total e relação volumétrica O/A.

Tabela 5.18: Parâmetros hidrodinâmicos para os testes de campo do MDIF.

Número Teste	d_{32} (μm)	D_{32} (mm)	d_{32}/D_{32} (%)	Tr (s)	Eficiência Separação (%)
1	821	4,0	21	0,79	28,43
2	821	3,8	22	0,88	68,21
3	1265	4,0	32	0,79	46,96
4	1265	3,8	33	0,83	71,25
5	686	4,0	17	0,79	28,03
6	686	3,8	18	0,88	66,87
7	1056	4,0	26	0,79	46,71
8	1056	3,8	28	0,88	80,95
9	1053	4,1	26	0,75	19,92
10	1053	3,7	28	0,93	74,53
11	681	3,9	17	0,83	63,32
12	1342	3,9	34	0,83	59,69
13	1245	3,9	32	0,83	49,90
14	904	3,9	23	0,83	54,72
15	1053	3,9	27	0,83	56,06
16	1053	3,9	27	0,83	61,84
17	1053	3,9	27	0,83	67,29
18	1053	3,9	27	0,83	58,49
19	1053	3,9	27	0,83	68,78
20	1053	3,9	27	0,83	68,90

A análise dos testes de campo sob o contexto das condições hidrodinâmicas apresenta possibilidades de melhor compreender o funcionamento do equipamento instalado. Desta forma, foram selecionados os testes que mostraram os melhores e os piores desempenhos.

Os melhores desempenhos, acima de 70% de eficiência de separação foram obtidos nos testes de número 4, 8 e 10. Nestes se observam características muito similares, tais como: alto tempo de residência (acima de 0,88s) e pequenos diâmetros da

gota transportadora (iguais ou menores que 3,8mm). Verifica-se, entretanto, que dois testes (4 e 8) com as mesmas características apresentam eficiência de separação diferente (71,25 e 80,95%, respectivamente). É possível que o maior diâmetro da gota dispersa no Teste 4 tenha impossibilitado uma melhor extração do óleo emulsionado na água produzida na câmara de mistura. Este óleo emulsionado na água produzida geralmente possui diâmetros compreendidos entre 50 e 100 μ m o que dificulta sua separação do interior da gota transportadora.

Os piores desempenhos, abaixo de 50% de eficiência de separação, foram os obtidos nos testes de número 1, 3, 5, 7 e 9. Nestes se observam características muito próximas, tais como: baixo tempo de residência (abaixo de 0,79s) e grandes diâmetros da gota transportadora (iguais ou maiores que 4,0mm). Verifica-se que para os dois pares de testes (1 e 5, 3 e 7) se conservam as mesmas características relativas ao diâmetro da gota transportadora e ao tempo de residência. Entretanto, o par (3 e 7) que apresenta a melhor eficiência de separação em relação ao par (1 e 5), 46% e 28%, respectivamente, possuem maiores diâmetros da gota gerada. É provável que o pequeno diâmetro (igual ou menor que 820 μ m) impossibilite a saída da gotícula transportada do interior da gota transportadora, quando o diâmetro desta tem valores acima de 4,0mm. Este fato é melhor compreendido quando se nota que os testes 2 e 6 também apresentam diâmetro da gotícula transportada igual ou menor que 820 μ m, mas possuem o diâmetro da gota transportadora da ordem de 3,8mm e um maior tempo de residência de 50s.

Existe uma relação bem estruturada para o efeito da eficiência de separação do equipamento de campo em função das três variáveis observadas obtidos por correlações utilizadas na literatura, quais sejam: o diâmetro médio da gotícula transportada gerada no reator da câmara de mistura; o diâmetro da gota transportadora gerada no prato perfurado e o tempo de residência da gota transportadora no interior do leito orgânico da câmara de decantação.

Transportando os dados hidrodinâmicos para os parâmetros físicos das variáveis controladas para o equipamento em campo, verifica-se que o melhor desempenho foram para as vazões da ordem de 10m³/h e acima em toda a faixa de relação volumétrica O/A e para velocidades de agitação de 83rpm e maiores.

5.3.4. Equação do Modelo para os testes de campo

A partir dos dados obtidos com os experimentos alimentou-se o programa Statistica Experimental Design para a obtenção de um modelo empírico capaz de prever a eficiência de separação para o aparelho, dentro do intervalo de estudo (-1,682 a 1,682, valores codificados) para as três variáveis trabalhadas (Equação 27). O coeficiente de regressão (R^2) obtido entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo estatístico de segunda ordem é de 0,92366.

$$E = 63,50877 + 16,76672X_{vaz} - 5,43785X_{vaz}^2 + 3,53079X_{rel} - 0,39035X_{rel}^2 + 1,15807X_{agit} - 3,64047X_{agit}^2 + 1,39875X_{rel}X_{agit} - 2,51125X_{rel}X_{vaz} + 1,12625X_{vaz}X_{agit} \quad (27)$$

A Figura 5.12 apresenta a relação entre os valores preditos e os valores observados para a eficiência de separação da UT-MDIF. Existe uma boa correlação entre os valores preditos e os observados, conforme se verifica com o valor obtido do coeficiente de regressão.

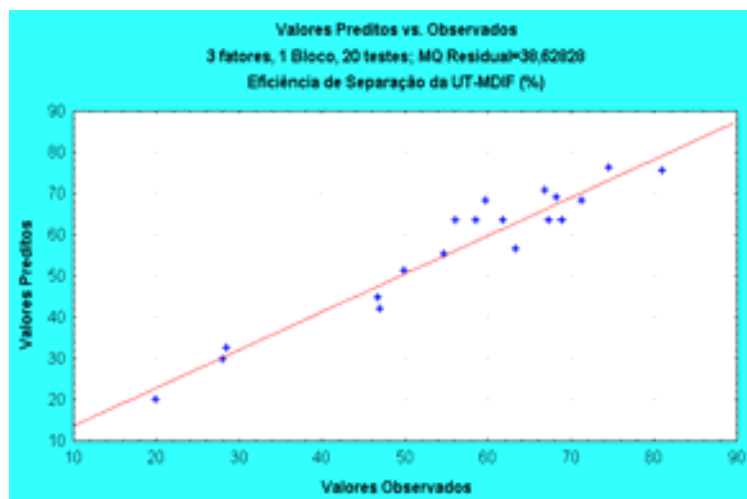


Figura 5.12: Valores preditos versus observados para a eficiência de separação nos testes de campo da UT-MDIF.

5.3.5. Análise das superfícies de resposta e curvas de nível

Apresentam-se a seguir as análises das superfícies de resposta geradas pelo programa Statistica Experimental Design com base na variável dependente *eficiência de separação* da UT-MDIF para os testes realizados no campo.

A Figura 5.13 apresenta a Superfície de Resposta para a eficiência de separação aplicada a uma vazão efetiva de 13,4 m³/h. Este foi o melhor desempenho obtido haja vista que a elevada eficiência de separação foi observada em toda a faixa de relação volumétrica O/A estudada. Note-se que nesta condição a velocidade de agitação se manteve próximo ao ponto central (90rpm) o que representa menor custo energético, uma vez que requer uma menor potência do agitador.

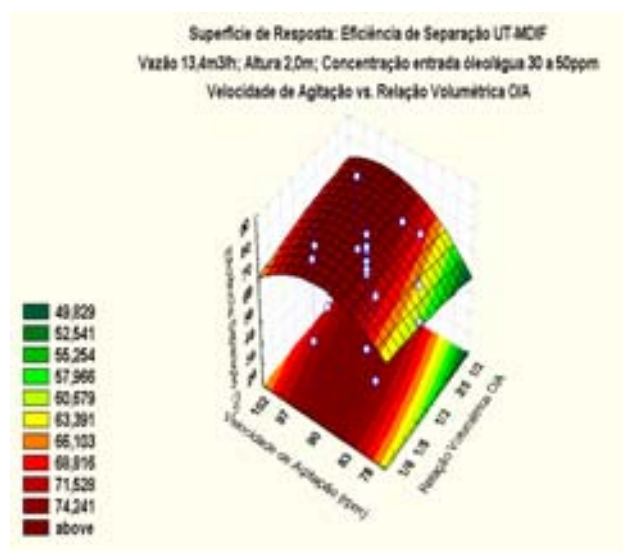


Figura 5.13. Superfície de Resposta para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.* (Vazão 13,4m³/h; Altura 2,0m)

As Figuras de 5.14 a 5.18 apresentam as curvas de nível da eficiência de separação em função das variáveis estudadas. Estas curvas mostram a elevação gradual da eficiência de separação do equipamento à medida que ocorre o acréscimo na vazão efetiva de 6,6 para 13,4m³/h.

Observa-se que o aumento da vazão efetiva de 6,6 para 13,4 m³/h (66 a 134% da carga operacional do equipamento) proporciona o acréscimo da eficiência de separação

de 29% para 76%. Quanto maior a vazão, maior a eficiência, para a faixa de vazão estudada.

Verifica-se o aumento da área de maior eficiência (região de cor vermelha) e também dos resultados de eficiência variando de 29 a 74%, quando a vazão é incrementada de 6,6 para 13,4m³/h. Inicialmente, para vazões entre 6,6 e 10,0m³/h, os maiores resultados de eficiência estão localizados na área de interseção entre a relação O/A maior que 1/3 e de velocidade de agitação acima de 83rpm. É provável que este resultado deva-se ao maior tempo de residência da mistura na câmara de agitação associado ao maior volume de orgânico, provocando uma maior coalescência entre as gotículas geradas.

Para velocidades acima de 12,0m³/h verificam-se os melhores resultados de eficiência de separação, sendo que para vazão de 13,4m³/h a área de abrangência da maior eficiência é praticamente para toda a faixa estudada, sendo melhor para menores relações O/A. Sendo esta vazão próxima à condição de jato, ocasionará a geração de gotas menores e menos uniformes, facilitando a saída da gotícula transportada do seu interior.

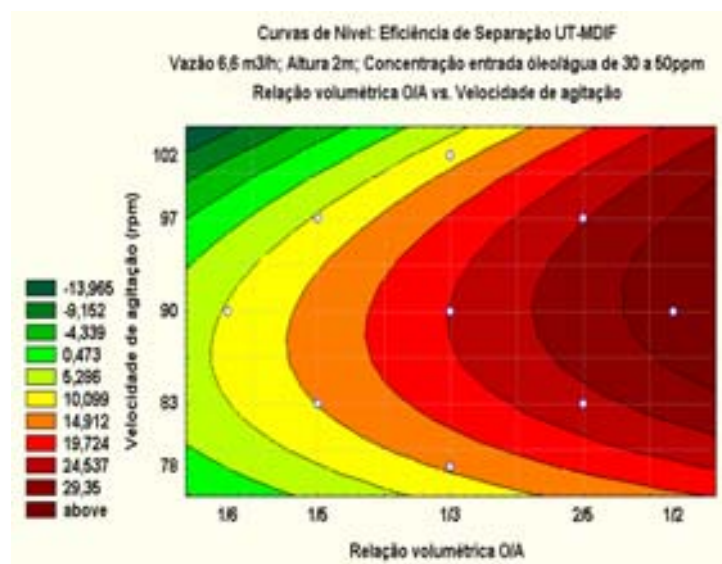


Figura 5.14. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.* (Vazão 6,6m³/h; Altura 2,0m)

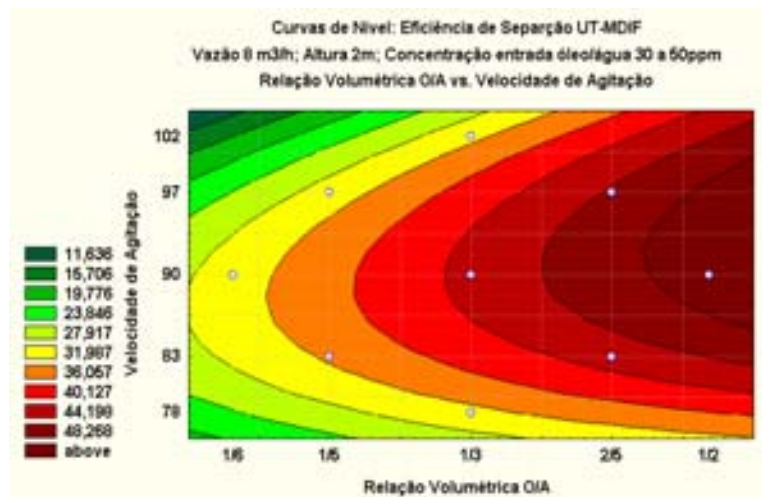


Figura 5.15. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.* (Vazão 8,0m³/h; Altura 2,0m)

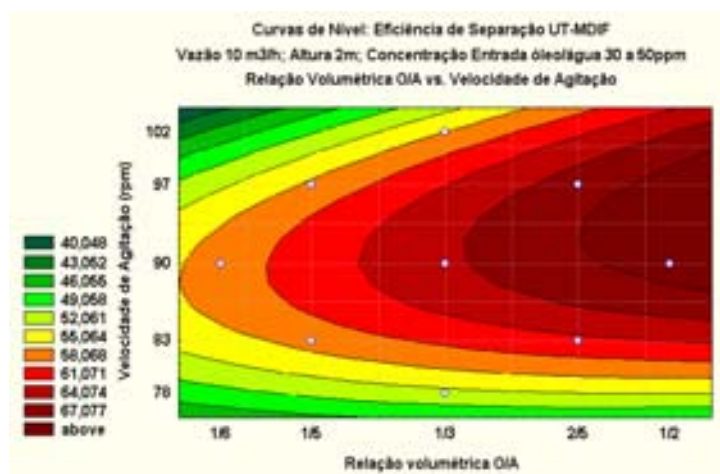


Figura 5.16. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.*(Vazão 10,0m³/h; Altura 2,0m)

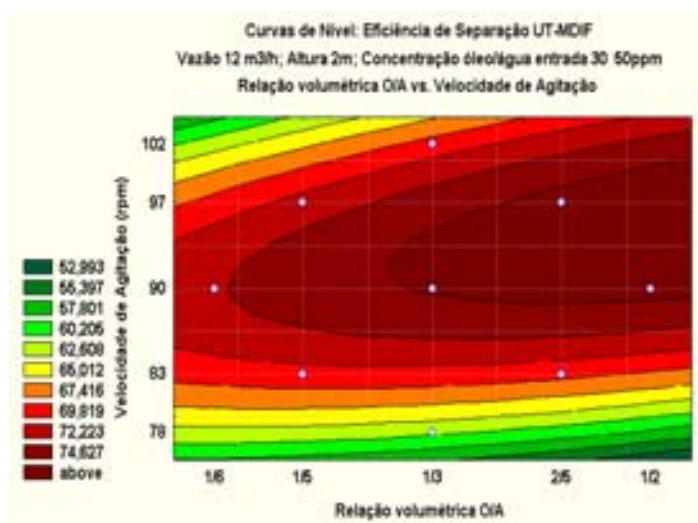


Figura 5.17. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.*(Vazão 12,0m³/h; Altura 2,0m)

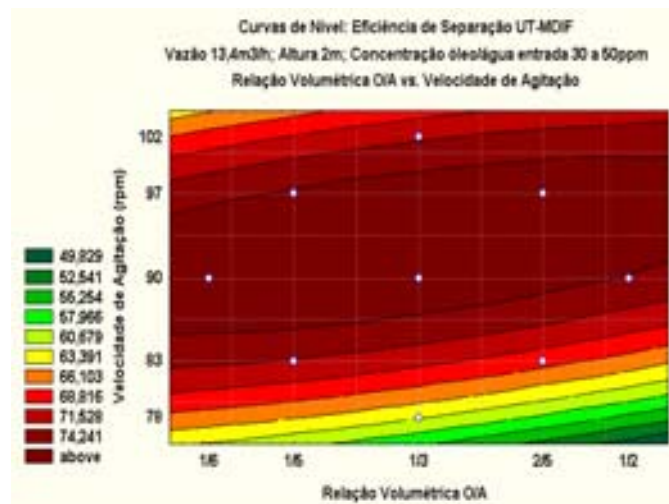


Figura 5.18. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.* (Vazão 13,4m³/h; Altura 2,0m)

5.3.6. Principais problemas encontrados durante os testes de campo

Os principais problemas encontrados após a operacionalização da UT-MDIF foram relacionados à composição da água produzida coletada da entrada do SAO, bem como o arraste de água tratada para o Vaso Acumulador.

5.3.6.1. Problemas decorrentes da composição da água produzida

Durante o período de testes ocorreu a deposição no SAO de sólidos resultantes da adição de produtos químicos nos oleodutos de chegada à Estação de Tratamento de Óleo do Pólo Industrial de Guamaré (ETO). Segundo técnicos da Petrobras, esta mistura de sólidos tinha na sua composição basicamente o sulfeto de ferro e areia. Após tratamento, a água efluente da ETO seguia para o dique de contenção e deste para o SAO. Os sólidos ficaram retidos, em sua maioria absoluta, dentro do SAO.

O ponto de admissão da água produzida para a UT-MDIF localiza-se na entrada do SAO. Assim sendo, a carga da unidade era composta deste produto indesejável. Para minimizar o arraste dos sólidos para a unidade foi instalado um filtro tipo cesta confeccionado pelo setor de caldeiraria da Petrobras, na descarga da bomba do aquoso. Entretanto, este acessório não conseguiu reter todas as partículas sólidas de

sua carga, devido ao grande volume presente na corrente de água produzida. Como resultado, observaram-se constantes obstruções no filtro, implicando em diversas paradas para limpeza da cesta. Além destas atividades, ocorreu obstrução nos orifícios do prato perfurado, sendo necessário parar e desmontar parcialmente a unidade para a realização da desobstrução. A Figura 5.19 mostra o elemento filtrante limpo do filtro de descarga da bomba do aquoso, enquanto que a Figura 5.20 apresenta o elemento obstruído, impregnado de óleo e sólidos.



Figura 5.19. Elemento limpo do filtro de descarga da bomba do aquoso.



Figura 5.20. Elemento sujo do filtro de descarga da bomba do aquoso.

O Prato perfurado da coluna da UT-MDIF obstruído com sujeira é apresentado na Figura 5.21. No detalhe, verifica-se a deposição de sólidos sobre os orifícios do prato, obstruindo-o parcialmente.



Figura 5.21. Prato perfurado sujo da coluna da UT-MDIF.

5.3.6.2. Problemas decorrentes do arraste de água para o vaso acumulador

O arraste da água tratada para o vaso acumulador decorre da velocidade de saída do orgânico carregado em óleo da câmara de decantação. Observou-se que vazões de orgânico acima de $2\text{ m}^3/\text{h}$ possibilitavam maior arraste de água tratada. O problema do arraste foi uma constante em todo o experimento, visto que as vazões utilizadas nos testes estavam acima da mínima vazão de orgânico que provocava o arraste. A vazão média da água arrastada por teste foi de $0,2\text{ m}^3/\text{h}$.

5.3.7. Análise da operação e testes de campo

O melhor desempenho do equipamento representado por uma eficiência de separação maior que 74% foi obtido com altas vazões efetivas da ordem de $13,4\text{ m}^3/\text{h}$ ou maiores ($>47,4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\text{ h}^{-1}$). Para o sistema estudado, esta eficiência de separação atende uma qualidade de água dentro dos padrões de especificação desejada pelo órgão ambiental ($<20\text{ ppm}$) para descarte. Estes resultados estão de acordo com experimentos anteriormente realizados em laboratório.

Os resultados dos testes para o protótipo de campo apresentam resultados próximos aos obtidos em laboratório. O aumento da eficiência de separação quando ocorre o aumento da vazão específica, é uma tendência em ambos equipamentos. Estes resultados permitem afirmar que a extrapolação foi executada utilizando a metodologia e os fundamentos corretos.

Conclui-se que é possível operar a baixas relações O/A em elevadas vazões efetivas. Esta condição operacional é altamente favorável do ponto vista industrial, porque representa além da economia no volume de solvente utilizado, a possibilidade de tratar um maior volume de água, concorrendo para um maior rendimento do aparelho. Verifica-se também que para uma mesma vazão, até a vazão de 10 m³/h, a eficiência aumenta com o acréscimo da relação volumétrica O/A. Este aumento na eficiência também está associado com o acréscimo na velocidade de agitação. Para vazões iguais ou maiores que 12 m³/h, observa-se que ocorre um deslocamento no sentido da menor relação volumétrica O/A, ou seja, os valores de maior eficiência de separação também são relacionados com a menor relação O/A, associada a todas as velocidades de agitação. É possível que o aumento da vazão efetiva junto com a menor relação O/A propicie a passagem de maior volume de aquoso pelos furos do prato, produzindo gotas transportadoras menores.

O deslocamento das condições operacionais para a área de melhor desempenho do equipamento é o próximo passo do planejamento central composto. O deslocamento visa aprimorar as condições operacionais de tal forma a obter as situações de melhor eficiência de separação.

5.3.8. Deslocamento do planejamento e modelagem da área de maior eficiência de separação.

O deslocamento com testes para a área de maior eficiência de separação é uma ferramenta da *Metodologia das Superfícies de Respostas* e visa aprofundar a informação em uma área de maior interesse. Estas etapas são repetidas tantas vezes quantas forem

necessárias, com o objetivo de atingir uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada.

Conforme analisado nos testes de campo, as áreas de maior eficiência de separação estão concentradas para vazões iguais ou maiores que $12 \text{ m}^3/\text{h}$ e velocidades de agitação iguais ou maiores que 90 rpm. A variável independente *relação O/A* proporcionou um ótimo rendimento em toda a faixa estudada, portanto serão mantidas as condições dos testes em laboratório e de campo, quais sejam, a variação de 1/6 até 1/2.

O planejamento estatístico experimental aplicado no deslocamento das condições operacionais para a área de maior eficiência de separação do equipamento de campo é o mesmo que foi aplicado ao equipamento em laboratório (item 4.1.2.2.5) e aos testes iniciais com o protótipo de campo.

No deslocamento foram analisadas as mesmas variáveis independentes dos testes iniciais de campo, quais sejam: vazão efetiva; relação volumétrica Orgânico/Aquoso (O/A) e velocidade de agitação na câmara de mistura. Também foram mantidas constantes a altura da câmara de decantação em 2,0 m e a concentração de óleo na alimentação do equipamento na faixa de 30 a 50 ppm. Novamente foi utilizado para o tratamento dos resultados obtidos o software *Statistica Experimental Design* versão 5.5. Os valores reais e codificados estão apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Valores reais e codificados para as variáveis independentes dos testes na área de deslocamento.

Valores reais das variáveis independentes			
Valores codificados	Relação	Vazão Efetiva (m ³ /h)	Velocidade de
	Volumétrica O/A	[específica m ³ m ⁻² h ⁻¹]	Agitação (rpm)
	X _{rel}	X _{vaz}	[veloc. periférica m/s]
			X _{agit}
-1,682	1/6	11,7 - [41,39]	89 [1,17]
-1	1/5	12,0 - [42,45]	92 [1,20]
0	1/3	12,5 - [44,22]	96 [1,26]
1	2/5	13,0 - [45,99]	100 [1,31]
1,682	1/2	13,3 - [47,05]	103 [1,35]

5.3.8.1. Resultados e discussão sobre os testes na região de deslocamento

Todos os experimentos com o MDIF foram realizados com réplica, para confirmação dos resultados.

As Tabelas 5.20 e 5.21 apresentam os resultados das análises de concentração de óleo em água na entrada e na saída da UT-MDIF, respectivamente.

Tabela 5.20: Valores das concentrações de óleo em água na entrada para os testes na região de maior eficiência da UT-MDIF.

Testes	Concentração na entrada (ppm)
3, 20, 14, 5, 19, 7	50
10,17,13	48
11,1	52
9, 12, 18	37
8, 16, 15	33
2, 6, 4	68

Tabela 5.21: Valores das concentrações de óleo em água na saída para os testes na região de maior eficiência da UT-MDIF.

Testes	Concentração na saída (ppm)
2, 3, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 1, 10, 9	<20
4, 5, 20.	>20

Os resultados de eficiência de separação dos testes válidos são apresentados na Tabela 5.22. Analisando-se esta tabela, observa-se que o teste em que se obteve a maior eficiência de separação foi o teste 6 com 76,34%, enquanto que o teste 1 apresentou o menor desempenho com 53,12%.

Comparando-se os resultados, observa-se que um aumento na vazão efetiva total, bem como na velocidade de agitação são fatores determinantes para o aumento na eficiência de separação.

Estes dados, se comparados com os resultados dos testes preliminares, verificam a mesma tendência para o aumento na eficiência quando se eleva a vazão efetiva e associa-se a maior velocidade de agitação. Observando o teste número 2 com a eficiência de 71,48% e comparando-o com o teste número 1, verifica-se que para a mesma relação O/A (1/5) e a mesma velocidade de agitação (92rpm), o aumento da vazão efetiva de 12,0 para 13,0 m³/h implicou em um acréscimo de 18,36% na eficiência de separação do equipamento de campo.

Quando se comparam os testes 2 e 6, verifica-se que a variável velocidade de agitação é elevada de 92 para 100rpm, traduzindo-se em um acréscimo na eficiência de separação de 4,86%.

A análise dos testes 11 e 12, que possuem a mesma vazão (12,5 m³/h) e mesma velocidade de agitação (96rpm), confirmam a tendência para a região de alta

vazão específica (acima de 42,45 m³/m²h) na qual a redução da relação O/A se traduz em acréscimo na eficiência de separação. Neste caso o acréscimo foi de 8,27%.

Tabela 5.22: Resultados dos testes válidos obtidos para a região de deslocamento.

Número Teste	Vazão Efetiva (m ³ /h)	Relação volumétrica O/A	Velocidade de Agitação (rpm)	Eficiência de Separação (%)
1	12,0	1/5	92	53,12
2	13,0	1/5	92	71,48
3	12,0	2/5	92	67,53
4	13,0	2/5	92	55,70
5	12,0	1/5	100	57,72
6	13,0	1/5	100	76,34
7	12,0	2/5	100	60,09
8	13,0	2/5	100	57,10
9	11,7	1/3	96	58,65
10	13,3	1/3	96	63,13
11	12,5	1/6	96	66,94
12	12,5	½	96	58,67
13	12,5	1/3	89	60,91
14	12,5	1/3	103	66,61
15	12,5	1/3	96	58,08
16	12,5	1/3	96	58,29
17	12,5	1/3	96	58,98
18	12,5	1/3	96	56,74
19	12,5	1/3	96	59,45
20	12,5	1/3	96	58,64

Os resultados dos testes confirmam a tendência da eficiência de separação com valores acima de 50% para toda a região de deslocamento estudada. Estes resultados

ressaltam que a região de alta vazão ($> 12\text{m}^3/\text{h}$) e alta velocidade de agitação ($>90\text{ rpm}$) possibilitam um maior incremento na eficiência de separação.

5.3.8.2. Análise de significância estatística para as variáveis independentes

Os dados da Tabela 5.23 apresentam as variáveis independentes que tem maior significância estatística e obedecem, basicamente, aos valores do teste F e do método do valor P para um fator. Sabe-se que para valores de $\text{MQ}_R / \text{MQ}_T > F_{1,n-p}$ tabelado (neste caso $F_{1,10}$ tabelado é igual a 4,96, Anexo 2), os fatores serão estatisticamente significantes. Para valores de $P < 0,01$ estes fatores terão elevada significância estatística. Para valores de P no intervalo entre 0,01 e 0,05, inclusive, os fatores serão estatisticamente significantes.

Observa-se pela Tabela 5.23 que todas as variáveis, bem como as interações entre a vazão efetiva e a relação volumétrica O/A e entre a relação O/A e a velocidade de agitação possuem elevada significância estatística. Ressalte-se que a interação entre a vazão efetiva e a relação volumétrica O/A, além de ter elevada significância estatística, também detém valores elevados para o teste F.

Tabela 5.23. Fatores de elevada significância estatística e estatisticamente significantes resultantes dos testes na região de maior eficiência da UT-MDIF.

Fatores	Distribuição F	Fator P
Vazão efetiva total (X_{vaz}) (L)	24,6140	0,000569
Relação volumétrica O/A (X_{rel}) (L)	28,8516	0,000314
Relação volumétrica O/A (X_{rel}) (Q)	12,3067	0,005650
Velocidade de agitação na câmara de mistura (X_{agit}) (L)	4,7226	0,054876
Velocidade de agitação na câmara de mistura (X_{agit}) (Q)	18,4854	0,001563
Interação entre a vazão efetiva x relação O/A ($X_{rel} \cdot X_{vaz}$)	127,87	0,000001
Interação entre relação O/A x agitação mistura ($X_{agit} \cdot X_{rel}$)	11,4491	0,006960

5.3.8.3. Equação do Modelo para a região de maior eficiência de separação

A partir dos dados obtidos com os experimentos alimentou-se o programa Statistica Experimental Design para a obtenção de um modelo empírico capaz de prever a eficiência de separação para o aparelho, dentro do intervalo de estudo (-1,682 a 1,682, valores codificados) para as três variáveis trabalhadas (Equação 28). O coeficiente de regressão (R^2) obtido entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo estatístico de segunda ordem é de 0,95851.

$$E = 58,37456 + 2,17417X_{vaz} + 0,81949X_{vaz}^2 - 2,35390X_{rel} + 1,49637X_{rel}^2 + 0,95235X_{agit} + 1,83393X_{agit}^2 - 6,47500X_{rel}X_{vaz} - 1,93751X_{rel}X_{agit} + 1,13750X_{vaz}X_{agit} \quad (28)$$

A Equação (28) do modelo gerado é válida para o intervalo definido, ou seja, para as variáveis X_{rel} , X_{vaz} e X_{agit} no intervalo de -1,682 a 1,682. Utiliza-se a Equação (28) com valores codificados para as variáveis independentes ou interações entre variáveis, enquanto que a variável resposta eficiência de separação é dada em percentagem (%).

5.3.8.4. Análise da variância do modelo Estatístico.

De acordo com a Tabela 5.24, o coeficiente de correlação entre as respostas observadas e os valores preditos pelo modelo estatístico de segunda ordem, ajustado para a eficiência de separação do MDIF, é de 0,95851. Com relação ao teste F, verifica-se que o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos dados obtidos pela equação. Observa-se que o valor do $F_{calculado}$ é 5,28 vezes o valor do $F_{tabelado}$ de 4,96, Anexo 3, a um nível de confiança de 95%, demonstrando que a equação ajustada é estatisticamente significativa e útil para fins preditivos (Box; Hunter; Hunter, 1978).

Tabela 5.24. Análise de variância para o ajuste do modelo para a área de maior eficiência da UT-MDIF.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Número de graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	618,8659	9	68,7629
Resíduos	26,2301	10	2,6230
Falta de ajuste	21,8716	5	4,3743
Erro puro	4,3585	5	0,8717
Total	759,5972	19	

% de variação explicada: 95,85

$F_{\text{calculado}} = MQ_R / MQ_r : 26,21$

$F_{\text{tabelado}} (95\%): 4,96$

$F_{\text{calculado}} / F_{\text{tabelado}}: 5,28$

A Figura 5.22 apresenta a relação entre os valores preditos e os valores observados para a eficiência de separação da UT-MDIF. Existe uma boa correlação entre os valores preditos e os observados, conforme se verifica com o valor obtido do coeficiente de regressão.

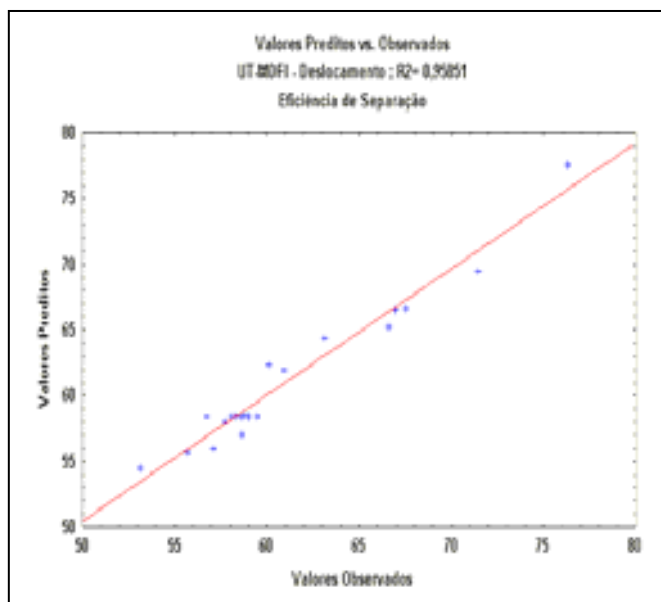


Figura 5.22: Valores preditos vs. observados para a área de maior eficiência.

5.3.8.5. Análise das superfícies de resposta.

Apresentam-se a seguir a análise das superfícies de resposta para a etapa de deslocamento. As curvas foram geradas pelo programa Statistica Experimental Design com base na variável dependente *eficiência de separação* do MDIF.

As Figuras de 5.23 a 5.27 mostram as curvas de nível da eficiência de separação em função das variáveis estudadas. Estas curvas mostram a elevação gradual da eficiência de separação do equipamento à medida que ocorre o acréscimo na vazão efetiva. Os melhores resultados estão na vazão de 13,3m³/h e relação O/A de 1/6.

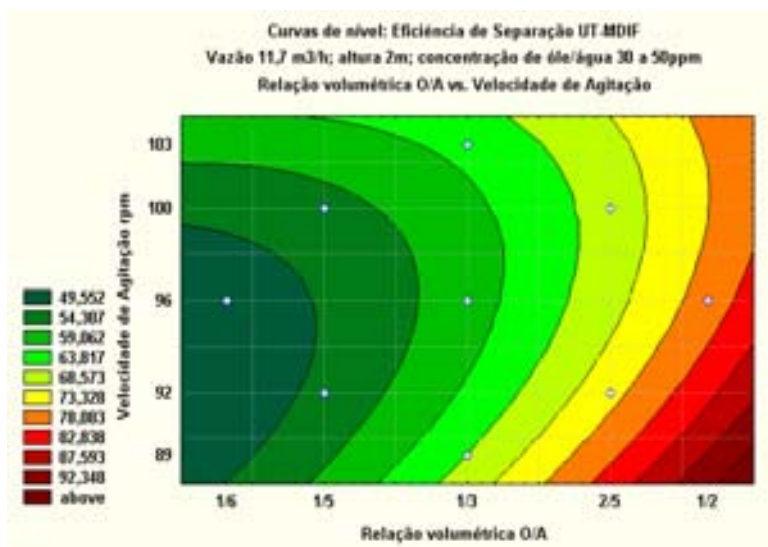


Figura 5.23. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação* vs. *Relação Volumétrica O/A*. (Vazão 11,7m³/h; Altura 2,0m)

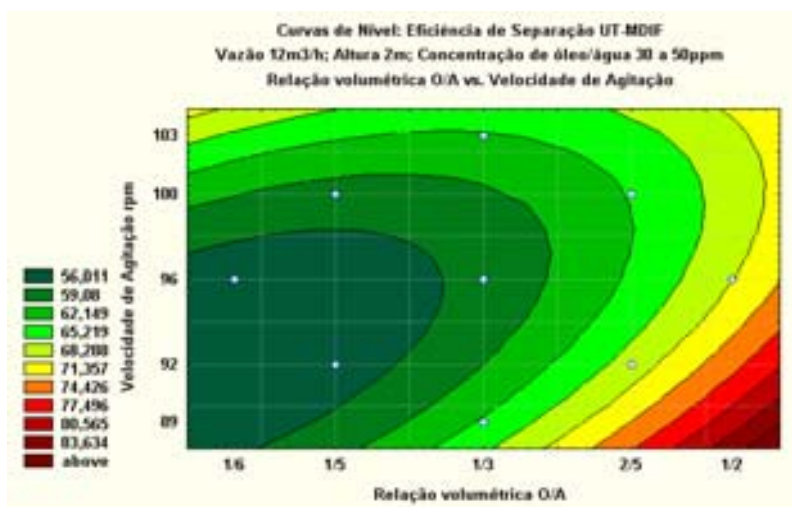


Figura 5.24. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação* vs. *Relação Volumétrica O/A*. (Vazão 12,0m³/h; Altura 2,0m)

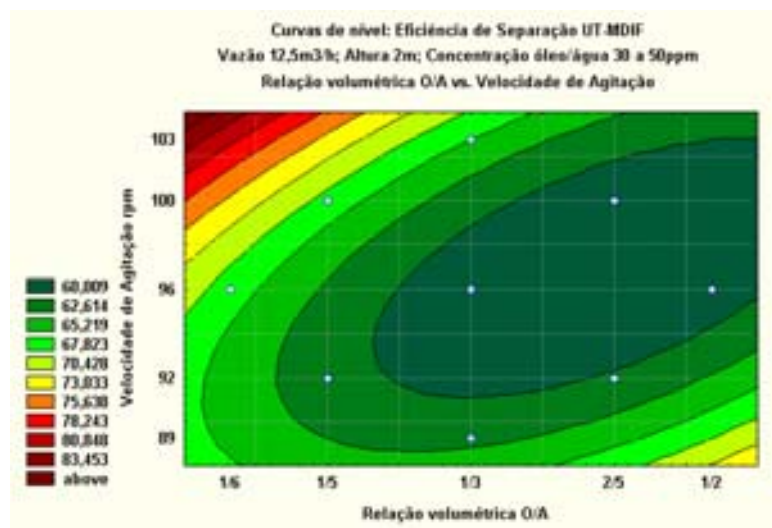


Figura 5.25. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.* (Vazão 12,5m³/h; Altura 2,0m)

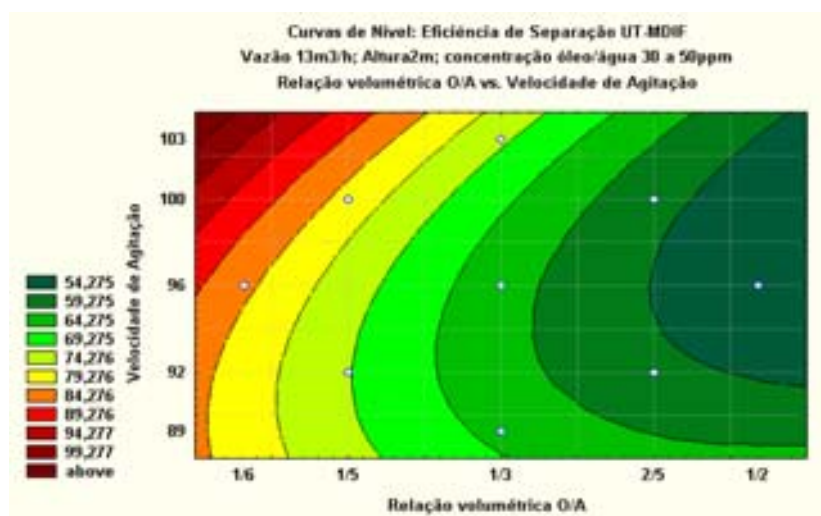


Figura 5.26. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação vs. Relação Volumétrica O/A.* (Vazão 13,0m³/h; Altura 2,0m)

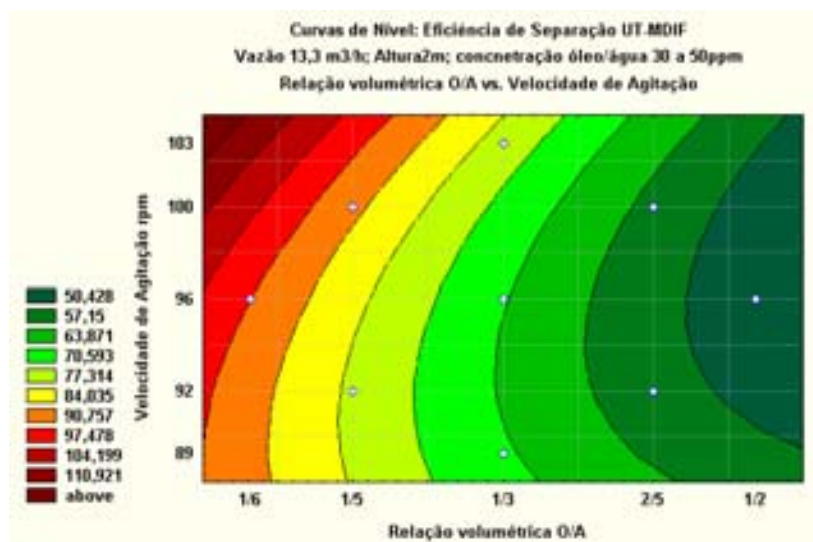


Figura 5.27. Curvas de Nível para a eficiência de separação da UT-MDIF. *Velocidade de Agitação* vs. *Relação Volumétrica O/A*. (Vazão 13,3m³/h; Altura 2,0m)

5.3.9. Análise da composição do orgânico após conclusão dos testes

Os testes realizados com a UT-MDIF demandaram duas etapas distintas: a etapa de exploração e a etapa de deslocamento. O orgânico utilizado para estas duas etapas foi o mesmo, sendo continuamente carregado em óleo, após extração da água produzida. A UT-MDIF processou 414 m³ de água produzida e utilizou para extração 135 m³ de orgânico, totalizando 549 m³ de carga operacional.

Realizou-se análise com o QAV carregado em óleo após a finalização dos testes (Tabela 5.25). Observa-se que a densidade e a viscosidade permaneceram constantes, enquanto que a tensão superficial apresentou um pequeno decréscimo. Estes dados possibilitam confirmar que o volume de orgânico existente no sistema manteve suas características físico-químicas para o volume total processado de água produzida.

Como resultado para a concentração do orgânico obteve-se 1,46 mL de óleo para cada litro de QAV. Desta forma, o volume final de óleo extraído, tomando-se como base os 10m³ de QAV puro armazenado no Vaso Acumulador, foi de 14,6L. Estimando-se uma concentração média de óleo em água de 40mg/L, resulta em 18,0L o total de óleo presente na carga processada. Logo, a eficiência total de extração do óleo da UT-MDIF para a carga processada foi de 81,1%.

Tabela 5.25. Propriedades físico-químicas do QAV utilizado nos testes da UT-MDIF.

Produto	Densidade (ρ) $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Viscosidade (μ) $\times 10^{-3} \text{ Pa.s}$	Tensão superficial (γ) $\times 10^{-3} \text{ N/m}$
QAV	0,804	0,910	34,72
QAV com óleo – etapa de exploração	0,7842	0,910	-
QAV com óleo – etapa deslocamento	0,7860	0,910	30,52

5.3.10. Simulações com a equação do modelo gerada

Realizaram-se simulações utilizando a equação do modelo para a área de maior rendimento (Equação 28) visando obter informações sobre as condições operacionais que possibilitem o tratamento da água produzida para a concentração especificada pelo órgão ambiental. Como a faixa de concentração de óleo em água da alimentação da UT-MDIF variou entre 30 e 50mg/L, optou-se por considerar a mais alta concentração, qual seja 50mg/L. Desta forma, apenas condições operacionais que proporcionem uma eficiência maior que 60% são de interesse para o processo associado. Os valores que alimentam a equação do modelo são aqueles codificados.

As Figuras 5.28 a 5.30 foram geradas simulando a vazão mínima de operação do equipamento (11,7 m³/h). Observa-se que os melhores resultados foram obtidos para a relação volumétrica O/A de 1/2 e para baixa velocidade de agitação (89rpm). Esta tendência é observada em trabalhos anteriores. Na condição de O/A de 1/6 e 1/3 praticamente não se conseguiria especificar a água tratada para descarte. Na condição O/A de 1/2 consegue-se especificar a água tratada em toda a faixa de velocidade de agitação estudada.

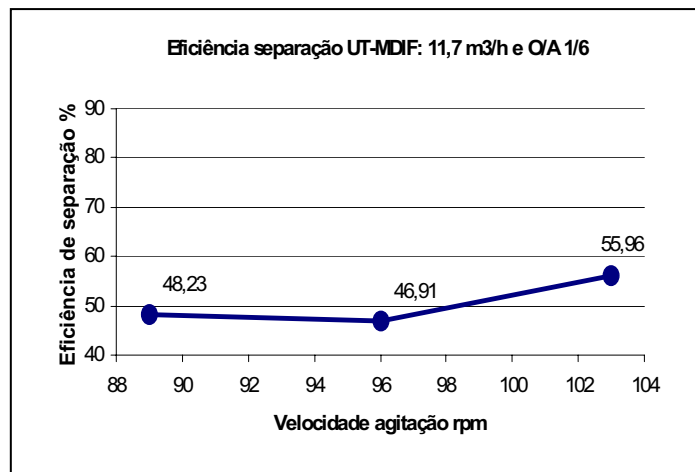


Figura 5.28. Eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 11,7 m³/h e O/A de 1/6.

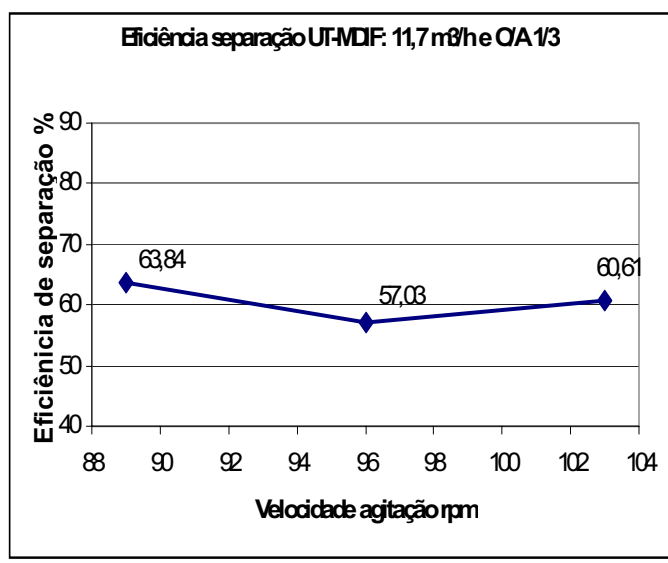


Figura 5.29. Eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 11,7 m³/h e O/A de 1/3.

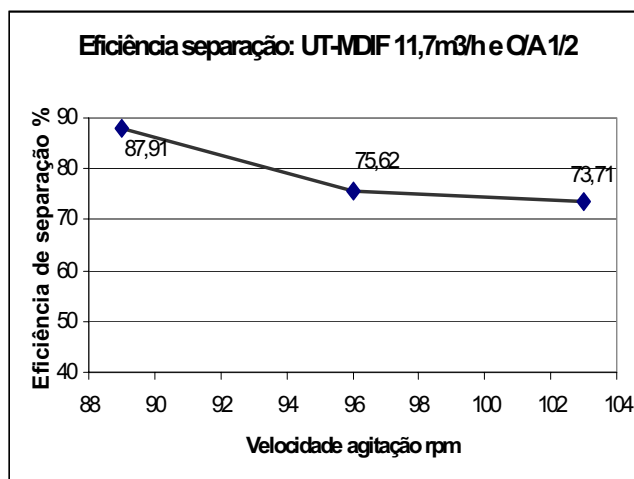


Figura 5.30. Eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 11,7m³/h e O/A de 1/2.

As Figuras 5.31 a 5.33 foram geradas simulando a vazão intermediária de operação do equipamento (12,5 m³/h). Observa-se que os melhores resultados foram obtidos para a relação volumétrica O/A de 1/6 e para altas velocidades de agitação (103rpm), mostrando um ponto de inflexão em relação à tendência da vazão específica anterior. Na condição de O/A de 1/3 praticamente não se conseguiria especificar a água tratada para descarte, enquanto que na condição O/A de 1/2 isto aconteceria apenas na de agitação (89rpm). Na condição O/A de 1/6 consegue-se especificar a água tratada em toda a faixa de velocidade de agitação estudada.

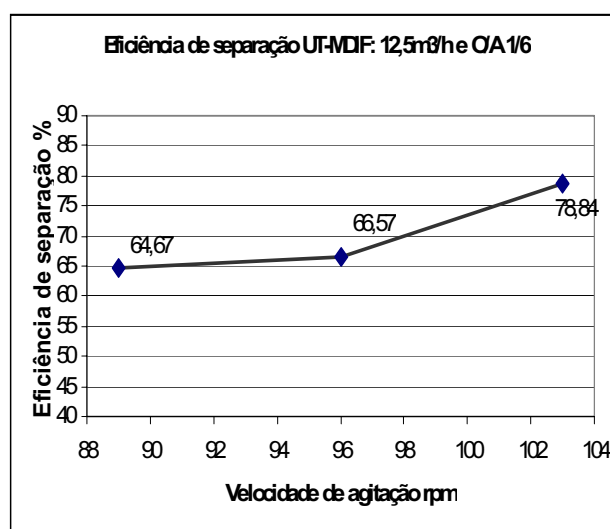


Figura 5.31. Eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 12,5m³/h e O/A de 1/6.

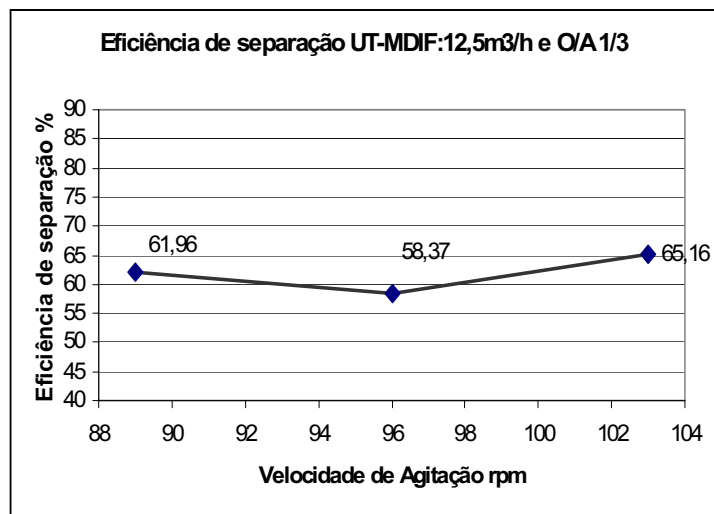


Figura 5.32. Eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 12,5m³/h e O/A de 1/3.

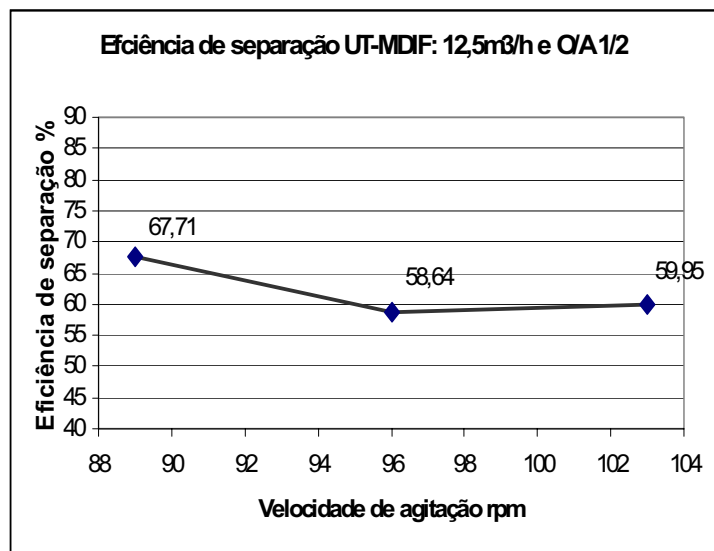


Figura 5.33. Eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 12,5m³/h e O/A de 1/2.

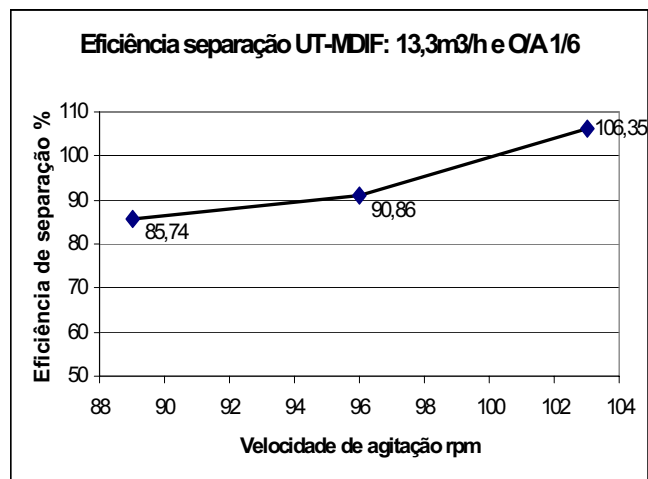


Figura 5.34. Gráfico da eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 13,3m³/h e O/A de 1/6.

As Figuras 5.34 a 5.36 foram geradas simulando a máxima vazão estudada de operação do equipamento (13,3 m³/h). Observa-se que os melhores resultados foram obtidos para a relação volumétrica O/A de 1/6 e para altas velocidades de agitação (103rpm), mostrando um ponto de inflexão em relação a tendência da vazão específica anterior. Na condição de O/A de 1/2 não se conseguiria especificar a água tratada para descarte, enquanto que na condição O/A de 1/3 a água sairia especificada.

Na condição O/A de 1/6 consegue-se especificar a água tratada em toda a faixa de velocidade de agitação estudada, assim como obtém-se a melhor performance do aparelho.

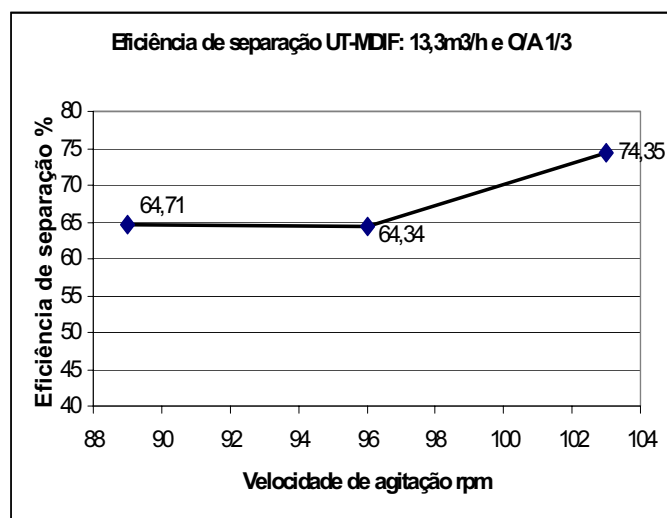


Figura 5.35. Gráfico da eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: 13,3m³/h e O/A de 1/3.

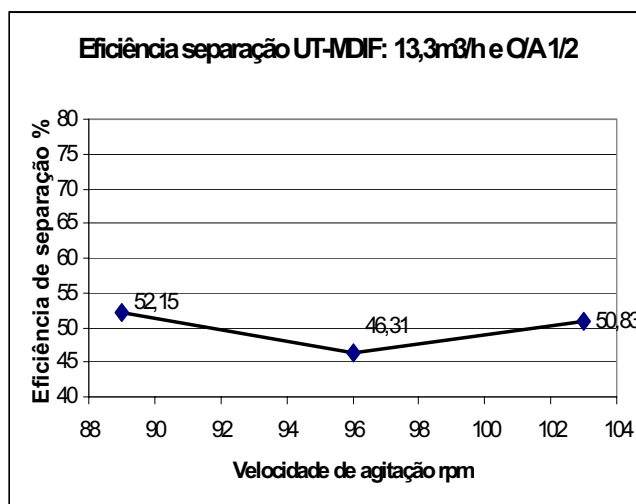


Figura 5.36. Gráfico da eficiência de separação da UT-MDIF utilizando a equação do modelo gerada para as condições: $13,3\text{m}^3/\text{h}$ e O/A de 1/2.

5.3.11. Considerações sobre o deslocamento da eficiência de separação

O deslocamento para a área de maior interesse industrial objetiva analisar a região onde se concentram os valores das variáveis, vazão efetiva (acima de $12\text{ m}^3/\text{h}$) e velocidade de agitação (acima de 90rpm) que propiciam uma maior eficiência de separação.

Os resultados apresentados no estudo do deslocamento para a área de maior eficiência de separação utilizando-se os dados obtidos pelos testes de campo, confirmaram a tendência antes observada. Observa-se que o aumento da vazão efetiva de $11,7$ para $13,3\text{ m}^3/\text{h}$ proporciona o acréscimo da eficiência de separação para valores acima de 80%. Verifica-se que os melhores resultados foram obtidos para altas vazões ($>12,5\text{m}^3/\text{h}$), altas velocidades de agitação ($>96\text{rpm}$) e baixas relações O/A (1/6).

Para vazões acima de $12,5\text{ m}^3/\text{h}$ observa-se uma elevação da eficiência de separação quando se aproxima da região de baixa relação O/A ($<1/5$) e alta velocidade de agitação. Por outro lado, a região de maior relação O/A ($>2/5$) confirma a tendência de decréscimo na eficiência de separação de 60 para 50%.

É possível que o aumento da vazão efetiva e a redução da relação O/A possibilitem uma maior passagem da água produzida pelo orifício calibrador,

aproximando-se o escoamento do regime de jato. Este regime propicia a produção de gotas transportadoras menores, fator este que contribui para o aumento na eficiência de separação do equipamento.

É provável que para uma melhor dispersão do orgânico no meio contínuo aquoso, para baixas relações O/A onde se tem um menor volume de orgânico, o aumento da velocidade de agitação para valores acima de 96rpm é a condição mais adequada.

A estabilização da densidade e da viscosidade do orgânico durante todo a realização do experimento permitiu a manutenção das condições físico-químicas do processo.

A equação do modelo gerado apresentou-se estatisticamente significativa e útil para fins preditivos. O coeficiente de regressão R^2 de 0,95851 e os gráficos dos valores preditos e observados, ratificam a geração de um bom modelo útil para predições da eficiência de separação do equipamento de campo para a faixa estudada.

6. Conclusão

Os principais objetivos da tese foram alcançados. Todas as etapas envolvidas na concepção, construção, montagem, operação e modelagem de uma unidade piloto ou semi-industrial de tratamento de água oleosa utilizando o princípio da inversão de fases (UT-MDIF) foram realizadas com êxito.

A UT-MDIF foi construída para tratar uma água oleosa proveniente da entrada do SAO-533401 da ETE do Pólo Industrial de Guamaré. Em condições otimizadas de operação a unidade de tratamento operou bem chegando a especificar a água para descarte de acordo com as condições exigidas pelo órgão ambiental. Todo o projeto foi desenvolvido na observância das normas Petrobras existentes.

A metodologia da extrapolação de escala do MDIF de laboratório para o MDIF de campo, utilizando a técnica da similaridade geométrica, foi empregada de forma eficaz. Os ajustes nas dimensões geométricas, seguindo as relações de laboratório são devidos à particularidade do projeto, pois o equipamento tem características de um misturador e de uma coluna spray. Na extrapolação de escala para a etapa de mistura seguiu-se a literatura disponível. Por outro lado, devido este ser um equipamento inovador no que diz respeito à separação de fases, a extrapolação para esta etapa foi realizada com base em artigos anteriormente publicados e em estudos desenvolvidos com o método da inversão de fases em laboratório.

A UT-MDIF encontra-se instalada no Pólo Industrial de Guamaré próximo ao SAO- 533401 e ocupa uma área de 100m². A unidade foi projetada para processar 240 m³/d de água oleosa e orgânico. A unidade operou com vazões de 320 m³/d (133% da carga nominal), sendo esta a condição de melhor performance obtida. Observou-se que na máxima vazão de teste operacional a coluna não atingiu seu ponto de inundação (flooding).

A coluna da UT-MDIF foi construída em fibra de vidro estrutural, contendo dois módulo de 1,00m e com uma base de 1,40m, sendo a altura total de 5,00m. O vaso acumulador de orgânico também construído em fibra de vidro estrutural tem capacidade

volumétrica de 15 m³, podendo armazenar todo o inventário da UT-MDIF, bem como o acréscimo de volume devido à saturação em óleo. A automação foi supervisionada pelo PLC instalado no container de campo, sendo este o responsável pela informação, monitoração, segurança e controle da unidade. O sistema de bombeio tem uma capacidade total de 408 m³/d.

Os resultados obtidos na etapa de testes de campo foram fundamentais na verificação efetiva do funcionamento do equipamento e na comprovação da especificação da água tratada. Além destes, associa-se à tendência da manutenção das características hidrodinâmicas sobre a eficiência de separação. Os resultados apresentados concordam com os testes de laboratório e literatura disponível, quando se associa o melhor rendimento a altas vazões efetivas.

O deslocamento para a área de maior eficiência de separação examinou a região onde se concentram os valores das variáveis: vazão efetiva (acima de 12 m³/h) e velocidade de agitação (acima de 90rpm). Os resultados apresentados no deslocamento para a área de maior eficiência de separação, dos dados obtidos pelos testes exploratórios, confirmaram a tendência antes observada.

Observa-se que o aumento da vazão efetiva de 11,7 para 13,3 m³/h proporciona o acréscimo da eficiência de separação para valores acima de 80%. Verifica-se que os melhores resultados foram obtidos para altas vazões (>12,5m³/h), altas velocidades de agitação (iguais ou maiores que 96rpm) e baixas relações O/A (1/6).

Para vazões acima de 12,5 m³/h observa-se uma elevação da eficiência de separação quando se aproxima da região de baixa relação O/A (<1/5) e alta velocidade de agitação. Por outro lado, na região de maior relação O/A (>2/5) confirma-se a tendência de decréscimo na eficiência de separação de 60 para 50%, quando se eleva a vazão efetiva do equipamento.

É possível que o aumento da vazão efetiva e a redução da relação O/A possibilitem uma maior passagem da água produzida pelo orifício calibrador, aproximando-se o escoamento do regime de jato. Este regime propicia a produção de

gotas transportadoras menores, fator este que contribui para o aumento na eficiência de separação do equipamento.

Os problemas apresentados de obstrução no elemento filtrante e no prato perfurado podem ser resolvidos com a instalação de sistema de filtração com filtros de maior diâmetro em paralelo e malha do elemento filtrante mais reduzida.

A equação do modelo gerado apresentou-se estatisticamente significativa e útil para fins preditivos. O coeficiente de regressão R^2 de 0,95851 e os gráficos dos valores preditos e observados, ratificam a geração de um bom e útil modelo para predições da eficiência de separação do equipamento de campo.

O equipamento apresentou bons resultados com a utilização de um orgânico – querosene de aviação - diferente da aguarrás que foi utilizada nos ensaios de laboratório e cálculos de extrapolação. Ressalte-se que ambos os orgânicos têm propriedades físico-químicas semelhantes. Este fato é positivo no caso de necessidade de diversificação do extratante. A estabilização da densidade e da viscosidade do orgânico durante todo a realização do experimento permitiu a manutenção das condições físico-químicas do processo.

A disposição vertical do aparelho representa um ganho ao economizar espaço no lay-out da planta de operação. A UT-MDIF mantém ainda as características gerais dos misturadores-decantadores convencionais: fortes cargas operacionais, facilidade de operação e manutenção e partidas operacionais simples.

A rota tecnológica utilizada fazendo uso da UT-MDIF pode se constituir numa alternativa real para tratamento de águas contaminadas com óleo a baixas concentrações (30 a 150 ppm).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMSON, Arthur W. **Physical chemistry of surfaces**. Fifth Ed. USA: Jonh Willey & Sons, 1990.

ANDRADE, J.C. ; EIRAS, S.P. e BRUNS, R.E. Study of the Mo (VI) catalytic response in the oxidation of iodide by hydrogen peroxide using a monosmented continuous flow system. **Anal. Chim. Acta** 255, 1991, pp. 149-155.

ANDREWS, Donald H.; KOKES, Richard J. **Química Geral**. Tradução de Oswaldo F. dos Santos, Carlos E. M. Neves, José L. S. Travassos. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1968.

AURELLE, Y. HADJIEV, D. BROUNHONESQUE, V. New two phase liquid-liquid separators. *Technology*, France, v. 2, p. 104, 1991.

AVELINO, S. et al. Recovery of cellulase by HPMC-salt precipitation. **Humana Press inc.** s.n., p.807-815, 1999.

ABNT/NBR. **N-7505-1**:Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis – Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários. ABNT, 2000. Norma - 16 páginas.

BARROS NETO, B. de; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS,R.E. **Como Fazer Experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas, editora da Unicamp, 2001.

BARROS NETO,B. de; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS,R.E. **Planejamento experimental e otimização de experimentos**. Campinas-Brasil, Editora da Unicamp, 1995.

BERTRAND, joël. **Extrapolation**: Agitation mecanique et melange. Toulouse – France. Laboratóire de Génie Chimique-INPT. 1992. Apostila. 18p.

BOX, G.E.P. , HUNTER, W.G. ; HUNTER, J. S. **Statistic for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building.** U.S.A. , John Wiley & Sons, 1978.

BISIO, A.; KABEL, R.L. **Scaleup of chemical processes: conversional from laboratory scale tests to successful commercial size design.** USA, John Wiley & Sons, 1985.

BRUNHARA-SALUM, S.S. **Otimização do processo de extração de colesterol do óleo de manteiga utilizando extrato de *Quiluaia saponaria*.** Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

CARVALHO, N.F.de. **Inspeção e manutenção de vasos de pressão.** Rio de Janeiro, Petrobras/ ABST-REF/RPBC, apostila, 138p. 1998.

CHAPMAN, R.E. **Petroleum geology: a concise study.** 2.ed. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

CHATZI, E. G.; GAVRIELIDES, A. D. AND KIPARISSIDES, C. Generalized Model for Prediction of the Steady-State Drop Size Distributions in Batch Stirred Vessels. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 28, p 1704-1711, 1989.

CHIAVENATO, M.C. **Utilização de um novo design de mixer-settler à inversão de fases para tratamento de dispersões e/ou emulsões do tipo óleo bruto/água de formação.** Natal-RN, 1999. 146p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COSTA, Carlos Alberto Soares da. **Tubulações Industriais: Palestra.** Natal: PETROBRAS/E&P-RNCE/GDRH, 1999. Apostila 11p.

COULSON, J.M. ; RICHARDSON, J.F. **Tecnologia Química: operações unitárias.** Trad. C.R. Carlos. 2.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1996.(v.II).

COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. **Tecnologia Química: uma introdução ao projecto em tecnologia química.** Lisboa-Portugal, fundação Calouste Gulbenkian, 1989 (volume VI).

COULALOGLOU, C. A. AND TAVLARIDES, L. L. Drop size distributions and coalescence frequencies of liquid-liquid dispersions in flow vessels. *Aiche Journal*, vol 22, p 298-297, 1976.

DALINGAROS, W.; KUMARA, A.; HARTLAND, S. Effect of physical properties and dispersed-phase velocity on the size of drops produced at a multi-nozzle distributor. *Chem. Eng. Process*, 1986, 20, pp. 95-102.

DANA, J.D.T.; HURLBUT Jr., C.S. **Manual de Mineralogia.** Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1970. (vol. I).

DAMAK, L. Nouveaux séparateurs d'émulsions huile/eau chargées en matières en suspension: séparateur à inversion de phases; coalesceur granulaire à lit pulsé. Tese de doutorado. INSA, Toulouse, 1992.

DEAN, Jonh A. **Handbook of organic chemistry.** USA: McGraw Hill, 1987.
CARVALHO, N.F.de. **Inspeção e manutenção de vasos de pressão.** Rio de Janeiro, Petrobras/ ABST-REF/RPBC, apostila,138p. 1998.

DE CHAZAL, L. E. M.; RYAN, J. T. *Aiche Journal*, vol 17, p 1226-1229, 1971.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípio das operações unitárias.** 2.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982.

FERNANDES JR, Wilaci Eutrópio. **Planejamento Experimental aplicado a um novo separador líquido-líquido utilizado no tratamento de águas residuais contaminadas com petróleo.** Natal - RN, 2002. 125p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

FERNANDES JR. et al. (a) Tratamento de águas contaminadas com petróleo através de novo design de misturador-decantador: concepção de um protótipo em escala semi-industrial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIO E METALURGIA EXTRATIVA – ENTMMME, 20, junho/2004, Florianópolis-SC.

GOMIDE, R.; **Operações com fluidos**. São Paulo, ERJ informática (volume II – 2ª parte), 1997

GODREY, J.C.; SLATER, M.J. Principles of mixer-settler design. In: LO, T.C. ; BAIRD, M.H.I.; HANSON, C. (coord.). **Handbook of solvent extraction**. U.S.A., John Wiley & Sons, 1983. cap. II, p.275-278.

HADJIEV, D.; KUYCHOUKOV, G. A separator for liquid-liquid dispersions. **The chemical engineering journal**, n.41, p.113-116, 1989.

HADJIEV, D.; AURELLE, Y. Phase inversion: a method for separation of fine liquid-liquid dispersions. **The chemical engineering journal**. N.58, p.45-51, 1995.

HADJIEV, D.; LIMOUSY, L.; SABIRI, N. E. The design of separators based on phase inversion at low velocities in the nozzles. *Separation and Purification Technology*, n. 38, p. 181-189, 2004.

HENLEY, E.J.; SEADER, J.D. **Equilibrium-stage separation operations in chemical engineering**. United States of America, John Wiley & Sons, 1981.

HUMBERTO, J.; AZEVEDO FILHO, J.D. **Curso de tratamento de óleo**. Bahia, EPBA/PETROBRAS, s.d.

KUMAR, A. AND HARTLAND, S. Trans. Inst. Chem. Eng., vol. 60, 35-39, 1982.

LEINZ, V.; AMARAL, S.E. do. **Geologia Geral**. 6.ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 1975.

LILEY, Peter E., GAMBILL, W.R. Dados físicos e químicos. In: Perry, Robert H.; Chilton, Cecil H. **Manual de Engenharia Química**. Tradução de Horácio Macedo, Luíza M. Barbosa e Paulo Emídio F. Barbosa. 5^a ed., Rio de Janeiro: Guanabara dois, 1980.

LIMA, A.F. **Caracterização e estudo da bioconversão da matéria orgânica dissolvida em efluentes da Petrobras no Rio Grande do Norte**. Natal, 1996.131p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

LINKO, S.; VAHERI, H.; SEPPÄLÄ, J. Production of poly- β -hydroxybutrate by *Alcaligenes eutrophus* on different carbon sources. **Applied Microbiology and Biotechnology**. n.39, p.11-15, 1993.

LISSANT, K.J. **Demulsification: industrial applications**. U.S.A., Marcel Dekker,1983. (Surfactant science series, v.13).

MERRITTS, D.J.; WET, A. de.; MENKING, K. **Environmental geology: na earth system science approach**. U.S.A., W.H. Freeman and Company, 1998.

MORAES, N. A. et al. Determinação da eficiência de separação óleo/água de um extrator líquido-líquido à inversão de fases: análise comparativa entre aguarrás e clorofórmio utilizando o método espectrofotométrico. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRN – CIENTEC, 13, novembro/2002, Natal-RN. **Anais resumos**, cd.

MORAES, N. A. et al. Estudo da Hidrodinâmica de um novo separador líquido-líquido: aplicação ao sistema óleo-bruto/água produzida. Natal - RN, 2005. 107p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. U.S.A., John Wiley & Sons, 1995.

(Wiley series in probability and statistics).

MUNK, P. **Introduction to macromolecular science**. USA: John Wiley & Sons, 1989.

MULLER, H. D. AND PILHOFER, T. Partikelbildung an Lochboden in Flüssig/Flüssig Systemen. Chem. Ing. Tech., vol 48, p 1069, 1976.

NAGATA, S.; YOSHIOKA, N.; YOKOYAMA, T.; TERAMOTO, D. **Agitation of two immiscible liquids**. Trans. Soc. Chem. Engrs. Of Japan, 8, p.43, 1950.

NEVES, C.F.C. **Desenvolvimento d uma instalação de separação de gases por adsorção e modelagem do processo**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

PAULO, J.B.A.; HADJIEV, D.; GOURDON, C.; CASAMATTA, G. Desempenho de um novo tipo de mixer-settler na extração de cobre. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILIANO D'INGEGNERIA MINERARIA, III, Verona-Italia, setembro-1994. p. 156-160.

PAULO, J.B.A.; HADJIEV, D.; GOURDON, C.; CASAMATTA, G. Mixer-Settler based on phase inversion. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILIANO D'INGEGNERIA MINERARIA, II, São Paulo, setembro/1993. **Anais** 1093-1100.

PAULO, J.B.A.; HADJIEV, D.; GOURDON, C.; Utilização de LIX 984 na extração de cobre através de um novo design de mixer-settler. In: Congresso Ítalo-Brasiliano D'ingegneria Mineraria IV, Canela/RS, 1996. p. 531-535.

PAULO, J.B.A.- Operação otimizada de um novo misturador-decantador à inversão de fase. Aplicação à extração de cobre. Toulouse-França, julho, 1996. 125p. Tese de Doutorado – Instituto Nacional Politécnico de Toulouse.

PERRUT, M.; LOUTATY, R. Drop size in a liquid-liquid dispersions: formation in jet break-up. **The chemical engineering journal**. n.3, p.286-293, 1972.

PETROBRAS/CONTEC. **N-57**: projeto mecânico de tubulação industrial. Rev. D, Petrobras, 1994. Norma - 40 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-58**: Símbolos gráficos para fluxogramas de processo e de engenharia. Rev. C, Petrobras, 1999. Norma - 34 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-59**: símbolo gráfico para desenhos de tubulação industrial. Rev. C, Petrobras, 1999. Norma - 31 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-75**: Abreviaturas para projetos industriais. Rev. C, Petrobras, 1997. Norma - 16 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-76**: Materiais de tubulação Rev. E, Petrobras, 1997. Norma - 145 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-108**: Suspiros e drenos para tubulações e equipamentos. Rev. B, Petrobras, 1998. Norma - 15 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-381**: Execução de desenho e outros documentos técnicos em geral. Rev. F, Petrobras, 2001. Norma - 17 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-1018**: Identificação de tanque e de vasos de pressão. Rev. D, Petrobras, 2002. Norma - 12 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-1521**: Identificação de equipamentos industriais. Rev. D, Petrobras, 1998. Norma - 17 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-1522**: Identificação de tubulações industriais. Rev. C, Petrobras, 1998. Norma - 14 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-1673**: Critérios de cálculo mecânico de tubulação. Rev. D, Petrobras, 2002. Norma - 16 páginas.

PETROBRAS/CONTEC. **N-1693**: Critérios para padronização de material de tubulação. Rev. D, Petrobras, 1998. Norma - 21 páginas.

PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D. **Plant design and economics for chemical engineers**. 4th ed. U.S.A. Mcgraw-Hill, 1991.

RABOCKAI, Tibor. **Físico-química de superfícies**. Washington/USA: Monografia OEA, 1979 (128p).

ROUSTAN, M. Opération chimiques unitaires: melange. IN: TOME, J. **Techniques de l'Ingénieur**. fasc. A5900, p. 1-20, 1993.

SCHEELE, G.F.; MEISTER, B.J. AICHe Journal, 1968, 14, pp. 15-19.

SHAW, Duncan J. **Introdução à química dos colóides e de superfícies**. Tradução de Juergenn H. Maar. São Paulo: Edgard Blucher, 1975.

TELLES, P.C.S. **Materiais para Equipamentos de Processo**. 5^a ed. Rio de Janeiro. Interciência, 1994.

TCHOBANOGLIOUS, George. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3rd ed. (revised Metcalf & Eddy, Inc). USA. McGraw-Hill, 1991.

THOMAS, José Eduardo (org.).- **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro, Interciência - Petrobras, 2001.

TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. Trad. de Alfredo Alves de Farias. 7^a ed. Rio de Janeiro, Livros técnicos e Científicos, 1999.

TRAMBOUZE, P.; van LANDEGHEM, H.; WANQUIER, J-P. **Les réacteurs chimiques**: conception, calcul, mise en oeuvre. Ed. Technip, Publ. de l'Institut Français du Pétrole, 1984.

VASCONCELOS, A.F.; BARBOSA, A.M.; DEKKER, R.F.H.; SCARMÍNIO, I.S. e RESENDE, M.I. Optimization of laccase production by *Botryosphaeria* sp. In the presence of veratryl alcohol by the response-surface method. **Process Biochemistry** **35**, 2000, pp. 1131-1138.

VOGERPOHL, A; GENENGER, B. LOHRENGHEL, B. LORENZ, M. Me system zur bestimmung hydrodynamischer parameter in mehrphasen-strömungen: fotoelektrische absaugsonde. Institut für Thermische Verfahrenstechnik der TU Claustal, 1994.

WERKEMA, M.C.C. e AGUIAR, S. **Otimização Estatística de Processos**: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria. Belo Horizonte - Brasil, Fundação Cristiano Ottoni, 1996. Série Ferramentas da Qualidade, vol 9.

ANEXO 1

1. Metodologia para a Realização das Análises dos Sistema em Estudo

1.1. Preparação das amostras de Água de formação

A água de formação ou de descarte é proveniente da entrada do Separador Água/Óleo (SAO-533401) da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) do Pólo Industrial de Guamaré/RN.

As amostras recebidas foram preservadas usando-se 5 mL de solução H₂SO₄ em água destilada (1:1), até garantir um pH igual ou menor que dois e mantidas sob refrigeração a 4 °C, conforme MT-Petrobras n°37-0084-0 de 1999.

As amostras foram filtradas. Em seguida, realizou-se a extração do óleo dissolvido com hexano em funil de separação. Após descanso de 12 horas, a água tratada isenta de óleo, foi transferida para diversos balões volumétricos de 100 mL.

1.2. Preparação das amostras do orgânico

Os orgânicos recebidos, uma mistura de hidrocarbonetos denominada de Aguarrás, são provenientes de dois pontos distintos da Unidade de Processamento de Gás Natural I (UPGN-I) do Pólo Industrial de Guamaré/RN.

A aguarrás proveniente do processo da UPGN-I tem coloração laranja. A aguarrás proveniente do Vaso V-400.05 possui cor amarelo claro. Ambas foram postas em balão volumétrico de 2.000 mL e acondicionadas longe do calor e da luminosidade.

1.3. Saturação mútua das amostras de água e orgânico para determinação das propriedades físico-químicas.

Em um béquer de 250 mL promove-se a saturação das fases aquosa e orgânica (1:1) através de forte agitação em agitador magnético, por 1 hora. A seguir, transfere-se

todo o conteúdo para um funil de separação de 250 mL, deixando decantar naturalmente por 24 h. As fases são posteriormente transferidas para dois balões de 100 mL.

1.4. Preparação das amostras de água destilada e orgânicos para análise do nitrogênio amoniacal.

Para a detecção de nitrogênio amoniacal nos orgânicos extratantes fornecidos, utiliza-se na extração da amônia a água destilada. Desta forma garante-se que a amônia detectada será totalmente proveniente do extratante.

Em béquer de 250 mL promove-se a saturação das fases aquosa (água destilada) e orgânica (1:1) sob forte agitação em agitador magnético, por 1 hora. Após, transfere-se todo o conteúdo para um funil de separação de 250 mL, deixando decantar por 24h. A fase aquosa é transferida para um balão de 100 mL para análise.

1.5. Análise da densidade

As determinações de densidade foram realizadas pelo *método do picnômetro*, conforme descrito por Danna e Hurlbut (1970).

O picnômetro é um pequeno frasco de vidro adaptado com uma rolha de vidro, através da qual foi perfurada uma abertura capilar.

O método consiste em tarar o picnômetro com água destilada anotando seu peso vazio e cheio, bem como o volume. O picnômetro é seco e, após resfriar em dessecador, é pesado vazio. Introduce-se a substância a ser medida, tendo-se o cuidado de evitar bolhas de ar no seu interior. A rolha de vidro é introduzida, tendo-se a precaução de secar as paredes externas com papel macio que não soltem fibras aderentes. Pesa-se o picnômetro cheio. Os valores obtidos são introduzidos na Equação (29). A temperatura ambiente é mantida constante em 25 °C. O modelo da balança analítica utilizada é o AG-200 da Gehaka com precisão de 0,0001g.

$$\rho = \frac{P - P'}{V} \quad (29)$$

onde,

Pv = peso do picnômetro vazio (g);

Pc = peso do picnômetro cheio (g);

V = volume do picnômetro (mL).

A população é constituída por 7 resultados de análise de densidade. A partir desta população selecionou-se 5 resultados para constituir a amostra, o que representa 71% da população.

1.6. Análise da Viscosidade

As análises de viscosidade são realizadas em *Viscosímetro Tipo Ubbelohde*. Munk (1989) afirma que um instrumento simples, mas preciso, para a medida da viscosidade é o viscosímetro capilar. O princípio da medida é baseado na Equação (30) de Poiseuille, que relaciona o tempo t necessário para um volume V do líquido atravessar um capilar de raio r e comprimento L com a viscosidade μ , quando a este é aplicado um diferencial de pressão ΔP nas suas extremidades. Quando os parâmetros de fabricação do viscosímetro e as condições da análise são mantidos constantes e ainda se têm dados confiáveis na literatura sobre um líquido padrão, pode-se utilizar a viscosidade relativa como forma de se determinar a viscosidade de um líquido qualquer, conforme Equação (31).

$$t = \frac{8LV \mu}{\pi r^4 \Delta P} \quad (30)$$

$$\mu_1 = \frac{t_1 \mu_0}{t_0} \quad (31)$$

onde,

μ_0 = viscosidade do líquido padrão (Pa.s)

μ_1 = viscosidade a determinar (Pa.s)

t_0 = tempo de escoamento do líquido padrão (s)

t_1 = tempo de escoamento do líquido a determinar (s).

O viscosímetro utilizado para as medidas de viscosidade é do tipo Ubbelohde, Figura A.1. O modelo empregado foi o AKV/O da Cannon-Fenske, de número 0 e precisão de 0,1 s, pertencente ao Laboratório de Membranas e Colóides do Departamento de Química da UFRN.

O método consiste em mergulhar o viscosímetro em um banho termostatzado (30°C). O líquido é introduzido no bulbo C (10 mL). Aguarda-se 10 minutos para que ocorra a equalização térmica. Tampona-se o bulbo A e produz-se vácuo no bulbo B. Quando o líquido ultrapassar a primeira marca de leitura, finaliza-se o vácuo e abre-se para a atmosfera as extremidades superiores dos bulbos A e B. Com cronômetro digital inicia-se a marcação do tempo de escoamento entre as duas marcas. Inicialmente mede-se o tempo para água destilada.

A viscosidade é calculada utilizando a Equação (31), onde se emprega a viscosidade para a água de 0,850 mPa.s, a 30°C (LILEY GAMBLL,1980).

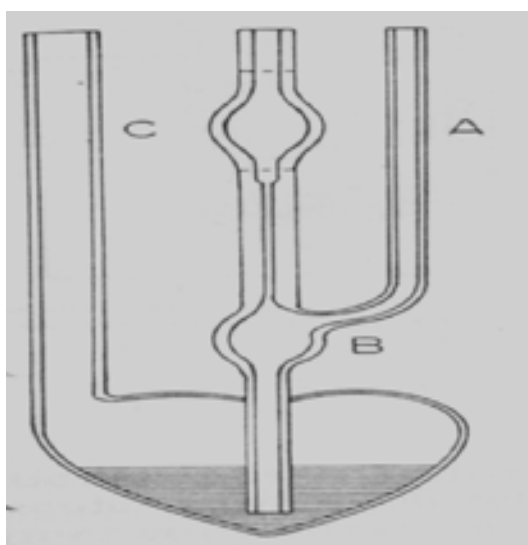


Figura A.1: Viscosímetro Ubbelohde.

(Fonte: Munk, 1989)

A população é constituída por 15 resultados de análise de viscosidade. A partir desta população selecionou-se 10 resultados para constituir a amostra, o que representa 66% da população.

1.7. Análise das Tensões superficiais e interfaciais

O método adotado para a medição das tensões superficiais e interfaciais é o *Método do Anel de Du Noüy*

Adamson (1990) relata que este é um método extremamente usado e envolve a determinação da força de separação de um anel ou círculo de arame da superfície de um líquido, conforme Figura A.2. Este método pertence à família dos métodos de separação e é de grande precisão. Os erros atribuídos ao tensiômetro usual em que o anel é construído de platina são da ordem de 0,5%. O anel é geralmente flambado em chama oxidante antes de cada medida, visando evitar que graxas o contaminem.

O tensiômetro utilizado para a realização das medidas de tensão superficial e interfacial é o do tipo Du Noüy fabricado pela Central Scientific Company (CSC), modelo 013384, pertencente ao laboratório de Alimentos do Departamento de Engenharia Química da UFRN.

Em um béquer de 50 mL são colocados 40 mL da amostra. A temperatura foi mantida constante em 25 °C. Introduce-se o anel a cerca de 1 cm abaixo da superfície da amostra (tensão superficial) ou 1 cm no interior da fase mais densa (tensão interfacial). Eleva-se cuidadosamente o anel até a ruptura do filme interfacial ou superficial. Existe uma relação direta entre a força de separação e a tensão superficial ou interfacial.

Na análise da tensão interfacial entre dois líquidos imiscíveis, se promove previamente a saturação mútua entre as fases, conforme orientação de Liley e Gambill (1980) e descrita no item 1.3, do Anexo 1.

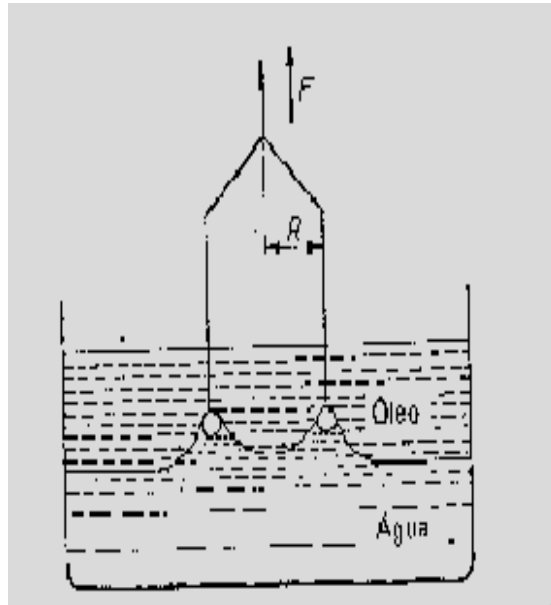


Figura A.2: Método do anel de Du Noüy.
(Fonte: Shaw, 1975)

A população é constituída por 15 resultados de análise de tensão superficial e 15 de tensão interfacial. A partir desta população selecionou-se 10 resultados para constituir a amostra, o que representa 66% da população.

1.8. Análises Complementares

Foram realizadas análises complementares da água de formação, com a finalidade de subsidiar as discussões sobre a utilização do tipo do orgânico a ser utilizado. Os laboratórios onde se realizaram as análises complementares estão descritos na Tabela A.1..

Tabela A.1. Laboratórios e equipamentos ou métodos utilizados para análises complementares.

Análise	Método ou Equipamento	Laboratório
pH	pHmetro Tec-3MP – Tecnal	Materiais/ DEQ/UFRN
Condutividade	Condutivímetro Tec-4MP - Tecnal	Materiais/ DEQ/UFRN
Turbidez	Turbidímetro – TH1000 – Tecnopon	Materiais/ DEQ/UFRN
Amônia	Método Titrimétrico (volumétrico)	Meio ambiente / DEQ / UFRN
Salinidade	Método Argentométrico ou de Mohr	Meio ambiente / DEQ / UFRN
Viscosidade do petróleo bruto	Reômetro: RS150 (Rheostress 150) – Haake.	Estudos do Petróleo / DQ / UFRN
Alcalinidade	Método de Kapp	Meio ambiente / DEQ / UFRN

ANEXO 2

2. Memória de Cálculo para a Extrapolação de Escala da UT-MDIF

2. 1. Extrapolação de escala da câmara de decantação.

Bio e Kabel (1985) orientam na Tabela 3.3 que a razão de scale up para sistemas que utilizem produtos líquidos não-viscosos deve ficar entre 100 e 500. Assim sendo, decidiu-se utilizar o valor de 100 para a razão de scale-up (Equação 18).

Peters e Timmerhaus (1991) apresentam na Tabela 3.4 que as variáveis mais importantes para a extrapolação de escala de separadores são o volume e o tempo de residência. Elegeu-se a *vazão efetiva* como variável mais importante nesta etapa que é determinante do MDIF.

Utilizando-se um fator de escala ou razão de scale-up de 100 vezes e aplicando-se a vazão efetiva média em laboratório de $0,1\text{m}^3/\text{h}$ obtém-se uma taxa de produção comercial ou, neste caso, de vazão efetiva do MDIF em escala piloto de **$10\text{m}^3/\text{h}$ ou $240\text{m}^3/\text{dia}$** .

A extrapolação da etapa de separação do MDIF, que se caracteriza como um fator preponderante na obtenção dos resultados do projeto, é de natureza peculiar. Esta é uma etapa complexa, pois como relatado, o aparelho combina características de um decantador convencional e de uma coluna spray. Por ser uma tecnologia inovadora aplicada à operação de extração líquido-líquido, não existe literatura disponível para realização da sua extrapolação. A metodologia para a realização do scale-up desta importante etapa no processo será a literatura disponível para operações em laboratório de autores como Hadjiev e Kuychoukov (1989) Hadjiev e Aurelle (1995), Paulo (1993, 1994, 1996), Chiavenato (1999), Hadjiev e Paulo (2002) e Fernandes Jr. (2002). Ressalte-se que estes autores foram os que mais se aprofundaram no estudo deste aparelho.

O design vertical do aparelho é mantido para sua construção em escala piloto, devido ser de grande utilidade para a instalação em locais de pequena área superficial.

Para o cálculo do diâmetro da câmara de decantação, verifica-se em trabalhos anteriores os excelentes resultados obtidos com este aparelho, quando se trabalha em vazões específicas da ordem de **40 m³/m²h ou mais**. Optou-se por utilizar esta vazão específica para o cálculo do diâmetro da câmara de decantação. Desta forma o diâmetro calculado é de **0,6m** e será o mesmo para o prato perfurado e interligação com as câmaras de mistura e separação uma vez que esta é a geometria do aparelho de laboratório.

Fernandes Jr. (2002) trabalhou com o sistema aguarrás-água produzida e com alturas da câmara de decantação de 0,5m, 0,75m e 1,0m, tendo concluído que a altura de 1,0m proporcionou melhor rendimento para todas as condições de concentração, velocidade de agitação, vazão efetiva e relação O/A empregadas. Hadjiev e Paulo (2002) trabalharam com um sistema querosene-água em que várias alturas de leito orgânico (câmara de decantação) foram empregadas. Estes autores chegaram à conclusão que o aumento de altura de 1,5m para 2,0m eleva em 2,5% a eficiência de separação. Acima de 2,0m não ocorreu aumento significativo na eficiência de separação. Levando em consideração estes autores e consultando-se os demais citados, optou-se por trabalhar com uma altura da câmara de decantação de **2,0m**.

A câmara de decantação, construída em fibra de vidro estrutural (Anexo 5), é totalmente preenchida com o orgânico, tendo fisicamente instalado no seu topo o prato perfurado e a saída do orgânico saturado em óleo. Na sua base monta-se a câmara de separação. As principais dimensões geométricas do projeto da câmara de decantação são apresentadas na Tabela A.2.

Tabela A.2. Principais dimensões da câmara de decantação do equipamento de campo.

Dimensões geométricas	Valores
Diâmetro	600 mm
Altura	2.000 mm
Material de construção	Fibra de vidro estrutural

2.1.1. Memória de Cálculo para a câmara de decantação.

Paulo et al (1994) obtiveram excelentes condições estudando o sistema querosene/água para vazão específicas da ordem de **40 m³/m²h**. Esta é a vazão específica da Equação (32) adotada para este projeto.

$$\text{Vazão específica} = \frac{\text{Vazão efetiva}}{\text{Área de fluxo da coluna}} \quad (32)$$

Desta forma, aplicando-se a vazão efetiva de 10 m³/h, obtemos o valor de 560mm, sendo aproximado para 600mm por motivos comerciais:

$$\mathbf{D_{\text{decantração}} = 600\text{mm.}}$$

Devido ao acréscimo no diâmetro, observa-se que a vazão específica será da ordem de 35,4 m³/m²h, mas em máxima vazão (13,4 m³/h) obtém-se 47,4 m³/m²h.

2.2. Extrapolação das câmaras de mistura e de separação

As câmaras de mistura e de separação possuem em laboratório a mesma configuração e dimensões geométricas.

Para a obtenção da dimensão **diâmetro externo** utilizou-se a similaridade geométrica, com os dados de laboratório, entre o diâmetro externo da câmara de mistura e o diâmetro da coluna em laboratório. Este valor (2,4) multiplicado pelo diâmetro da coluna de campo (0,6m) tem por produto um diâmetro de **1,4m**. Para a altura da câmara levou-se em consideração uma altura de líquido de 0,5m necessária ao processo e a altura do reator dentro da câmara. Desta forma a altura calculada foi de **1,5m**. As câmaras de mistura e separação têm a mesma configuração geométrica.

2.2.1. Extrapolação de escala da câmara de mistura

A câmara de mistura, construída em fibra de vidro estrutural (anexo 4), terá como função suportar o reator e receber deste o líquido efluente. Será parcialmente preenchida pelo orgânico na sua base. Fisicamente está instalada acima do prato perfurado no topo da câmara de decantação. A Tabela A.3 apresenta as principais dimensões do projeto da câmara de mistura da unidade de campo.

Tabela A.3. Principais dimensões da câmara de mistura do equipamento de campo.

Dimensões geométricas	Valores
Menor diâmetro externo	600 mm
Maior diâmetro externo	1.400 mm
Altura	1.500 mm
Material de construção	Fibra de vidro estrutural

2.2.1.1 Memória de cálculo da altura da câmara de mistura

O reator de campo terá uma altura de 1.000mm e será instalado dentro da câmara de mistura. O nível de líquido acima do prato perfurado deverá ser tal que não permita a entrada de ar no processo. Optou-se por acrescentar 500mm à altura da câmara. Logo a altura total da câmara de mistura será:

$$H_{\text{mistura}} = 1.500\text{mm}$$

A relação entre os diâmetros da parte superior e inferior da câmara de mistura em escala de laboratório é de 2,4. Aplicando este fator encontramos que:

$$D_{\text{superiormistura}} = 1.400\text{mm}$$

2.2.2. Extrapolação de escala da Câmara de Separação

A câmara de separação, construída em fibra de vidro estrutural, terá como função receber os efluentes da câmara de decantação. Neste vaso encontra-se a interface de separação orgânico-água tratada. Será totalmente preenchida pela água tratada.

Fisicamente está instalada sob a base da câmara de decantação. A Tabela A.4 apresenta as principais dimensões do projeto da câmara de separação.

Tabela A.4. Principais dimensões da câmara de separação do equipamento de campo.

Dimensões geométricas	Valores
Menor diâmetro externo	600 mm
Maior diâmetro externo	1.400 mm
Altura	1.500 mm
Material de construção	Fibra de vidro estrutural

2.3. Extrapolação do reator-misturador.

Na câmara de mistura estão localizados o reator e o misturador. A metodologia empregada para a extrapolação do conjunto reator/misturador é amplamente difundida, tendo sido estudada por diversos autores.

De acordo com Bertrand (1992) adotou-se para o conjunto reator-misturador a *similaridade geométrica* e como parâmetro invariável à *velocidade periférica*.

Utilizou-se a equação de Nagata (1950) para determinar a rotação mínima para a dispersão do orgânico no aquoso nas condições de laboratório. Obteve-se uma agitação mínima de 639,30rpm. A velocidade periférica mínima é de 1,005m/s. O número de Reynolds foi da ordem de $1,1 \times 10^4$, significando que o sistema é turbulento ($Re \geq 10^4$).

O Fator de escala, número empregado para a conversão dos valores das propriedades obtidas em laboratório para campo, sendo $K=d_2/d_1$, relação entre diâmetros dos impelidores, foi calculado em 8,3.

2.3.1. Extrapolação de escala do Reator

O reator, construído em aço inoxidável, deve proporcionar as condições para a realização da transferência de massa do óleo do meio aquoso para o orgânico extratante. Será preenchido pelo aquoso (fase contínua) e pelo orgânico (fase dispersa).

Fisicamente está instalado dentro da câmara de mistura. A Tabela A.5 apresenta as principais dimensões do projeto do reator.

Tabela A.5. Principais dimensões do reator do equipamento de campo.

Dimensões geométricas	Valores
Diâmetro	600 mm
Altura	1.000 mm
Número de defletores	4
Largura dos defletores	74mm
Altura do impelidor à base do reator	372mm
Material de construção	Aço inoxidável

2.3.2. Extrapolação de escala do Misturador

O misturador com seu impelidor construído em aço inoxidável tem como função promover a dispersão do orgânico no meio aquoso quando ambos alcançam o reator. Fisicamente está instalado dentro do reator. A Tabela A.6 apresenta as principais dimensões do projeto da câmara de mistura.

Tabela A.6. Principais dimensões do misturador para o equipamento de campo.

Dimensões	Valores
Diâmetro do impelidor	250 mm
Altura da haste do impelidor	800 mm
Altura do impelidor	37,5 mm
Largura do impelidor	62,5 mm
Tipo da turbina	Rushton
Número de pás	6
Material de construção	Aço inoxidável

2.3.3. Memória de cálculo para o conjunto reator-misturador.

- a) Cálculo da **agitação mínima em laboratório** para a dispersão entre as fases aguarrás (meio disperso) e água de formação (meio contínuo). Utiliza-se a Equação (3) de Nagata (1950).

onde:

N_c = Agitação mínima da dispersão de ma fase em otra (pm)

K = Konstante de posição do agitador (para agitação no entro)

D = Diâmetro interno do vaso agitado (m);

Condição *Reynolds*: diâmetro do impelidor d_i

μ_c viscosidade da fase contínua $(\text{kg/m.s})^{-1}$;

ρ_c densidade da fase contínua (kg/m^3)

ρ_d densidade da fase dispersa (kg/m^3)

Aplicando estes valores à Equação (3) de Nagata, obtemos o valor da agitação mínima de dispersão entre fases:

$$N_{cr} = 639,30 \text{rpm ou } 10,66 \text{ rps}$$

b) Cálculo da *velocidade periférica mínima* em laboratório para a dispersão entre as fases, utilizando a Equação (33).

$$V_p = \pi N d_i$$

Onde:

V_p velocidade periférica (m/s)

N velocidade do agitador (ps)

d_i diâmetro do impelidor (m)

Aplicando na equação, obtemos:

$$V_p = 1,005 \text{m/s}$$

c) Cálculo do **número de Reynolds** para as condições de laboratório, utilizando a Equação (4).

Onde:

Re = número de Reynolds;

N velocidade do agitador (ps)

d_i diâmetro do impelidor (m)

μ_c viscosidade da fase contínua $(\text{kg/m.s})^{-1}$;

ρ_c densidade da fase contínua (kg/m^3)

Aplicando na equação estes valores, obtém-se $1,1 \times 10^4 > 10^4$, caracterizando o regime por turbulento.

Utiliza-se o artigo de Bertrand (1992) como base para o cálculo das dimensões do reator e da câmara de mistura. Elegeu-se para extrapolação a **Similaridade Geométrica**. A Figura A.3 apresenta o desenho esquemático de um reator com suas principais dimensões em escala de laboratório e em escala industrial.

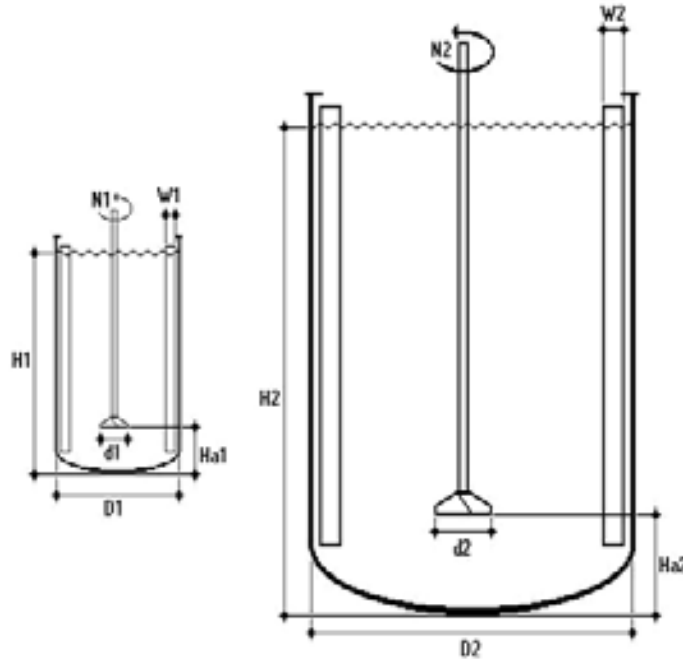


Figura.A.3..Desenho esquemático de um reator em escala de laboratório e industrial.

(Fonte: Bertrand, 1992)

As equações abaixo mostram a relação geométrica entre as suas principais dimensões. A Equação (34) apresenta as relações geométricas entre os diâmetros dos impelidores da escala laboratório e da escala semi-industrial.

$$\frac{d_1}{D_1} = \frac{d_2}{D_2} \quad (34)$$

onde:

d_1 = diâmetro do impelidor em escala de laboratório;

d_2 = diâmetro do impelidor em escala industrial;

D_1 = diâmetro do reator em escala de laboratório;

D_2 = diâmetro do reator em escala industrial.

A Equação (35) apresenta as relações geométricas entre as alturas dos reatores da escala laboratório e da escala semi-industrial.

$$\frac{H_1}{D_1} = \frac{H_2}{D_2} \quad (35)$$

Onde:

H_1 = altura do reator em escala de laboratório;

H_2 = altura do reator em escala industrial.

A Equação (36) apresenta as relações geométricas entre as alturas da base dos reatores ao impelidor da escala laboratório e da escala semi-industrial.

$$\frac{H_{a1}}{D_1} = \frac{H_{a2}}{D_2} \quad (36)$$

Onde:

H_{a1} = altura da base do reator ao impelidor em escala de laboratório;

H_{a2} = altura da base do reator ao impelidor em escala industrial.

A Equação (37) apresenta as relações geométricas entre as larguras dos defletores da escala laboratório e da escala semi-industrial.

$$\frac{W_1}{D_1} = \frac{W_2}{D_2} \quad (37)$$

Onde:

W_1 = largura do defletor em escala de laboratório;

W_2 = largura do defletor em escala industrial.

O autor enfatiza que os pontos geometricamente importantes são os descritos abaixo:

- i) A geometria do impelidor do agitador;
- ii) A relação entre os diâmetros do impelidor e do reator ($d/D = \text{constante}$);
- iii) A forma do reator e a altura relativa do líquido ($H/D = \text{constante}$);
- iv) Os equipamentos internos do reator (defletores, serpentinas, etc.);
- v) A posição do impelidor em relação à base do reator ($H_a/D = \text{constante}$).

No início da extrapolação deve-se eleger uma propriedade invariante, sendo recomendado para a similaridade geométrica que se opte por uma das seguintes propriedades: número de Reynolds, número de Froude, número de Weber, velocidade periférica (V_p) ou razão potência por unidade de volume (P/V). Determinou-se que a propriedade invariante seja a **Velocidade Periférica**.

A velocidade periférica, em escala de laboratório, para os valores de 750 rpm (12,5rps) e 900rpm (15,0 rps) são 1,2 m/s e 1,4 m/s, respectivamente. O **número de Reynolds**, em escala de laboratório, para os valores de 750 rpm (12,5rps) e 900rpm (15,0 rps) são **$1,3 \times 10^4$** e **$1,5 \times 10^4$** , respectivamente. Ambos estão em regime turbulento.

d) Relações entre dimensões para escala de laboratório

d_1 = diâmetro do impelidor: 0,03m;

D_1 = diâmetro do reator: 0,073m;

W_1 = largura dos defletores: 0,009m;

H_1 = Altura do reator: 0,135m;

Ha_1 = Altura da base do reator ao impelidor: 0,045m.

$d_1/D_1 = 0,41$ (condição para turbina tipo Rushton)

$H_1/D_1 = 1,8$

$Ha_1/D_1 = 0,62$

$W_1/D_1 = 0,12$

e) Volume do reator em escala de laboratório

Utilizando os dados contidos no item “d”, e aplicando-se na equação do volume, temos:

$$V = 5,7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

f) Cálculo da **potência requerida por unidade de volume**, em laboratório, Equação

(38).

$$P \propto \rho \cdot N^3 \cdot d^5 \quad (38)$$

Onde:

P = Potência transferida para o fluido (W)

N_p = constante (para reator com defletores = 5);

ρ_c = densidade da fase contínua (Kg/m^3): 1002,2;

N = Velocidade de agitação (rps): p/ 750rpm = 12,55 e p/ 900 rpm = 15;

d = diâmetro do impelidor (m): 0,03;

Desta forma, temos:

P/ Agitação de 750rpm: **P = 0,24W**

P/ Agitação de 900rpm: **P = 0,41W**

Assim, a potência requerida por unidade de volume (P/V) será:

P/ 750rpm: **P/V = 421W/m³**

P/ 900rpm: **P/V = 719W/m³**

g) Dimensões do **reator** para o MDIF industrial.

Conforme **Brtrand** (1992) deve-se manter as condições geométricas fundamentais, quais sejam:

- i) Os dutos de transporte dos fluidos (dois) devem seguir paralelos e juntos às chicanas, conforme modelo de laboratório;
- ii) O vaso agitado contém quatro defletores dispostos diametralmente;
- iii) O impelidor é do tipo Rushton, com seis pás retas.

Diâmetro já calculado da coluna = 600mm;

Como, em laboratório, o **diâmetro do reator** é igual ao da coluna, desta forma:

$$D_2 = 600\text{mm}$$

Obtém-se a altura do reator abaixo:

A relação $H_1 / D_1 = 1,8$; como $H_1 / D_1 = H_2 / D_2$;

$$H_2 = 1.000\text{mm}$$

O **diâmetro do impelidor** (d_2) segue a condição da turbina tipo Rushton, qual seja a de $d_2 \approx D/2$. Assim, o diâmetro será de:

$$d_2 \approx 250\text{mm}$$

h) Para a **largura do defletor** segue-se a Equação (37). Assim a largura será:

$$W_2 = 74\text{mm}$$

i) Distância da **base do reator ao impelidor** (H_{a2}), segue a Equação (36). Então, a distância será de:

$$H_{a2} = 372\text{mm}$$

j) **Geometria do impelidor**

Escala de laboratório(1)

As dimensões geométricas do impelidor em laboratório são as seguintes:

$$d_1 = 0,03\text{m}$$

$$h_1 = 0,0045\text{m}$$

$$L_1 = 0,0075\text{m}$$

As relações geométricas do impelidor em laboratório são:

$$d_1/h_1 = 6,67$$

$$d_1/L_1 = 4,0$$

As dimensões para a Escala Industrial (2) serão:

d_2 está definido no item g: $d_2 = 250\text{mm}$

$$d_1/h_1 = d_2/h_2 = 6,67, \text{ logo, } h_2 = 37,5\text{mm}$$

$$d_1/L_1 = d_2/L_2 = 4,0, \text{ logo, } L_2 = 62,5\text{mm}$$

Dimensões da haste do impelidor.

A haste do impelidor, quando muito extensa, provoca vibrações desnecessárias que podem danificar o conjunto motor-agitador. Após análise, determinou-se que a haste terá a extensão necessária para a sua finalidade definitiva, qual seja a de transmitir o movimento do motor ao impelidor.

O reator terá uma altura de 1.000mm. O impelidor ficará distante da base do reator em 372mm, logo dentro do reator tem-se um comprimento de haste de 628mm. Acrescentam-se 172mm de haste externa ao reator, necessários à conexão com o motor. Desta forma, o tamanho de haste necessário será de:

$$L_{\text{haste}} = 800\text{mm}$$

k) Cálculo do **Fator de Escala (K)**

O fator de escala K é definido pela equação (39) abaixo:

$$K = \frac{d_2}{d_1} \quad (39)$$

Desta forma o fator de escala será:

$$\mathbf{K = 8,3}$$

l) **Agitação mínima** para dispersão das fases em escala industrial.

A velocidade periférica é a propriedade invariante, logo temos que:

$$v = \pi N_1 d_1 = \pi N_2 d_2$$

Onde:

v : velocidade periférica (abratório industrial)(m/s)

Anexos

N_1 = velocidade de agitação mínima no impelidor, em laboratório (rps)

N_2 = velocidade de agitação mínima no impelidor, em escala industrial (rps)

d_1 = diâmetro do impelidor do laboratório (m)

d_2 = diâmetro do impelidor, em escala industrial (m)

Desta forma, a velocidade mínima de dispersão entre fases será:

$$N_2 = 1,27 \text{ rps} = 76 \text{ rpm}$$

Assim sendo, para as velocidades de agitação de laboratório temos suas correspondentes em escala industrial, quais sejam:

P/ 750rpm ($V_p = 1,2 \text{ m/s}$), temos $N_2 = 1,53 \text{ rps} = 92 \text{ rpm}$

P/ 900rpm ($V_p = 1,4 \text{ m/s}$), temos $N_2 = 1,78 \text{ rps} = 107 \text{ rpm}$

m) Número de Reynolds para escala industrial

Utilizando as informações de Brand (1992) obtemos a seguinte Equação (40), que relaciona o número de Reynolds na nova condição de campo:

$$N_{Re2} = N_{Re1} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad (40)$$

Conseqüentemente, o Número de Reynolds (para agitação de 92rpm) será:

$$N_{Re2} = 1,08 \times 10^4$$

Significando que o regime em escala industrial é caracterizado por ser **turbulento**.

n) **Potência requerida por unidade de volume**, Equação (41).

$$\frac{P_2}{V_2} = K^{-1} \frac{P_1}{V_1} \quad (41)$$

P/ 750rpm em laboratório a relação $P_1/V_1 = 421\text{W/m}^3$. Aplicando na Equação (41), temos:

$$P_2/V_2 = 50,7 \text{ W/m}^3$$

Aplicando para a máxima vazão efetiva do planejamento estatístico experimental, $Q=13,4 \text{ m}^3/\text{h}$, obtemos a potência requerida:

$$P_2 = 683,4\text{W} = 0,92\text{HP}$$

P/ 900rpm em laboratório a relação $P_1/V_1 = 791\text{W/m}^3$. Aplicando na Equação (41), temos:

$$P_2/V_2 = 87 \text{ W/m}^3$$

Aplicando para a máxima vazão efetiva do planejamento estatístico experimental, $Q=13,4 \text{ m}^3/\text{h}$, obtemos a potência máxima requerida com os dados planejados:

$$P_2 = 1165,8\text{W} = 1,56\text{HP}$$

2.4. Extrapolação de escala para o Prato Perfurado

Para o cálculo das dimensões do prato perfurado utilizou-se a similaridade geométrica (BRTRAND, 1992). Assim sendo, manteve-se no prato a fração da área cega (1/4), a transparência que representa a razão entre a área perfurada e a área total do prato (5%), o material de construção (technyl), o diâmetro e a configuração da malha do furo (1mm e configuração triangular).

O prato perfurado, confeccionado em technyl, tem como função calibrar o diâmetro da gota transportadora de aquoso que contém em seu interior gotas de aguarrás carregadas em óleo. O prato será completamente imerso na fase orgânica. Fisicamente está instalado acima da câmara de decantação. A Tabela A.7 apresenta as principais dimensões do projeto do prato perfurado.

Tabela A.7. Principais dimensões do prato perfurado do equipamento de campo.

Dimensões geométricas	Valores
Diâmetro	600 mm
Espessura	20mm
Altura do defletor	200mm
Espessura do defletor	20mm
Distância do defletor à borda do prato	150mm
Diâmetro dos furos	1,0mm
Número de furos	12.821
Transparência	5%
Área cega	1/4
Material de construção	technyl

2.4.1. Memória de cálculo para o Prato Perfurado

a) Condições de similaridade geométrica para cálculo das dimensões do prato perfurado:

- Material: technyl;
- Área cega: 1/4;
- Transparência: 5%;
- Diâmetro do furo: 1mm.

Como o diâmetro do prato é o mesmo diâmetro da coluna, então este será de 600mm. Assim, a área total ($\pi d^2/4$) será de 0,28 m². A área cega (1/4) será de 0,07m² e a área disponível para a transparência (0,28 – 0,07) será de **0,21m²**.

A área a ser perfurada será de **5%** da área disponível (0,21m²), ou seja, de **0,01m²**. A área de cada furo (d = 1mm) será de 7,8x10⁻⁷ m². O número de furos será dado pela razão entre a área disponível para furos e a área de cada furo. Desta forma o número de furos será de **12.821**.

Visto que em laboratório o prato, após alguns testes, veio a deformar, adotaremos uma espessura de **20mm**, pois espessuras maiores dificultariam a aquisição no mercado. A altura do defletor será de **1/5** da altura da câmara de decantação (supondo um módulo de 1.000mm de altura), ou seja, de **200mm**. A distância da borda até o início dos furos será de **150mm** (1/4 de 600mm).

Considerações:

O cálculo da altura do defletor, utilizando a similaridade geométrica, deve considerar:

$$\text{Razão laboratório} = \frac{\text{altura defletor}}{\text{diâmetro da câmara de decantação}}$$

Desta forma, como a altura em laboratório é de 54mm e o diâmetro 50mm, esta razão é de 1,08. Se esta relação fosse em função da altura da coluna, seria de 5%. Aplicando este fator para o MDIF-campo, onde o diâmetro é de 600mm teríamos uma altura do defletor de 650mm ou 65%. Este valor é mais da metade da altura câmara de decantação (1.000mm), o que impediria uma boa distribuição granulométrica das gotas transportadoras. Assim sendo, optou-se por reduzir a **altura do defletor para 200mm**, ou 20% da altura para o mínimo valor de altura da câmara. As partes componentes do MDIF industrial montadas conforme sua concepção e extrapolação de escala são apresentadas na Figura A.4.

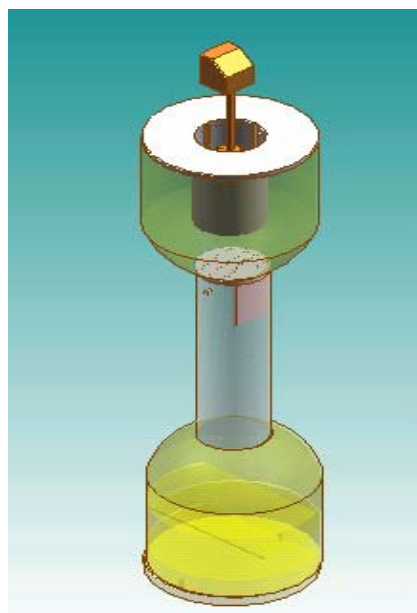


Figura A.4. Conjunto principal do projeto do MDIF industrial com todas as partes constituintes instaladas.

2.5. Resultados específicos para a extrapolação de escala dos equipamentos da UT-MDIF.

Este item tem como objetivo detalhar os equipamentos auxiliares, instrumentação, tubulação e acessórios da Unidade de Tratamento de Água Oleosa através do processo do Misturador-decantador à Inversão de Fases (UT-MDIF) a ser construída, bem como o fluxograma de engenharia e de processo com suas respectivas interligações. A unidade UT-MDIF recebeu da Petrobras o código de identificação (TAG) número U-3404.09.

O detalhamento dos equipamentos é feito de acordo com as normas da Petrobras, incluindo parâmetros de dimensionamento, memorial de cálculo, folhas de especificações e desenhos de fabricação. O mesmo tratamento foi dado aos acessórios, instrumentação e equipamentos que compõem o sistema e que se fazem necessários para a operação.

A metodologia utilizada para a concepção e detalhamento da Unidade de Tratamento de Água oleosa baseada no MDIF (UT-MDIF) seguiu orientação das normas Petrobras, da ABNT e literatura específica. As seguintes normas da Petrobras e ABNT foram consultadas:

- a. PETROBRAS N-57: Projeto mecânico de tubulação industrial;
- b. PETROBRAS N-58: Símbolos gráficos para fluxogramas em sistemas industriais;
- c. PETROBRAS N-59: Símbolos gráficos para desenho de tubulação industrial;
- d. PETROBRAS N-75: Abreviaturas para projetos industriais;
- e. PETROBRAS N-76: Materiais de tubulações;
- f. PETROBRAS N-108: Suspiros e drenos para tubulação;
- g. PETROBRAS N-381: Execução de desenho e outros documentos técnicos em geral;
- h. PETROBRAS N-1018: Identificação de tanques e vasos de pressão;
- i. PETROBRAS N-1521: Identificação de equipamentos industriais;
- j. PETROBRAS N-1522: Identificação de linhas de tubulação;
- k. PETROBRAS N-1673: Critérios mecânicos de cálculos de tubulações;
- l. PETROBRAS N-1693: Critérios para padronização de material de tubulação;
- m. ABNT NBR-7505-1: Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis

As propriedades físico-químicas do sistema estudado são aquelas das fases mutuamente saturadas constantes na Tabela 5.4.

2.5.1. Local de instalação da UT-MDIF

O local de instalação da UT-MDIF será próximo ao SAO-533401 existente na Estação de Tratamento de Efluentes - ETE do Pólo Industrial de Guamaré - RN.

O descarte da água tratada do MDIF se dará para o interior do SAO-533401 por diferença de altura de coluna líquida entre o MDIF e o SAO.

2.5.2 Dados climáticos e condições de utilidades no limite de bateria.

O Manual de Operações do Pólo Guamaré MA-3404.17.1234-950-MON-901 fornece os seguintes dados sobre as condições de utilidades no limite de bateria do MDIF (Tabela A.8) e condições climáticas (Tabela A.9).

Tabela A.8. Condições de utilidades no limite de bateria da UT-MDIF.

Ar de serviço	Pressão operação = 7,5 a 8,0 Kgf/cm ²
Ar de instrumento	Pressão operação = 7,5 a 8,0 Kgf/cm ²
Água industrial	Pressão operação = 0,5 Kgf/cm ²
Água de incêndio	Pressão operação = 7,0 Kgf/cm ²

Tabela A.9: Dados climáticos do Pólo Industrial de Guamaré.

Temperatura ambiente	Mínima = 18 °C Máxima = 36 °C Média = 27 °C
Pressão atmosférica	101,15 kPa
Velocidade dos ventos	Média = 30 Km/h Máxima = 120 Km/h
Direção dos ventos	Maio/outubro = SE/NW Novembro/abril = E/W
Precipitações pluviométricas	Média anual = 60mm Máxima em 24h = 148mm

2.5.3 Bacia de contenção da UT-MDIF.

As instalações da UT- MDIF destinam-se à pesquisa científica.

Erros (1998) explica que os diques e a bacia de contenção objetivam a segurança da instalação de armazenamento, tendo como finalidades: conter o produto em caso de rompimento de tubulação ou tanques; conter o produto em caso de falha operacional ou limitar o incêndio a uma pequena área.

A NB-7505-1 (2000) recomenda que o volume da bacia de contenção seja no mínimo igual ao volume do maior tanque mais o volume equivalente ao deslocamento dos demais tanques.

A bacia de contenção foi projetada para um volume de 2,0 vezes o volume do inventário do processo da UT- MDIF.

2.5.4. Especificação das tubulações, equipamentos e acessórios que compõem a planta da UT-MDIF.

a) Serviços com água salgada

Telles (1994) orienta que para serviços em águas que apresentem pequena quantidade de sal (por exemplo, efluentes de processo) pode-se aceitar o aço carbono para cascos de vasos e tubos de condução, sempre com sobre-espessura mínima de 4mm. Para válvulas de diâmetro menor ou igual a 2", recomenda-se que sejam de bronze com internos de bronze. Para válvulas de diâmetro igual ou maior que 3" recomenda-se que sejam construídas de ferro fundido com internos de bronze.

b) Serviços com hidrocarbonetos.

Para serviços com petróleo doce (sweet) em que a quantidade de enxofre em peso é inferior a 1% e a temperatura de trabalho é menor que 320 °C, recomenda-se aço carbono para vasos e tubos para condução (TELLES, 1994).

c) Utilização do aço carbono.

Telles (1994) define o aço carbono com uma liga Fe-C, contendo teoricamente 0,05 a 2,0% de carbono.

A norma Petrobras N-1693 (1998) que trata dos “Critérios para padronização de material para tubulações” recomenda no item 4.2.2 que “para diâmetros de tubulações menores que 10” a espessura dos tubos é designada por schedule”.

Costa (1999) recomenda a Norma Brasileira ABNT P-P225 como responsável pela especificação do diâmetro nominal dos tubos. As normas classificam os tubos para condução de aço carbono, para diâmetros nominais de 1/8”a 12”. O diâmetro nominal não corresponde a nenhuma dimensão física dos tubos. Para o autor, em cada diâmetro nominal, ao se variar a série, varia-se a espessura da parede. O *schedule* é obtido de acordo com a Equação (42).

$$SCH = \frac{1000 \cdot P}{S} \quad (42)$$

onde,

SCH = Série ou Schedule Number;

P = Pressão interna (psi);

S = Tensão admissível do material (psi);

A norma Petrobras N-1673 (1985) que trata dos “critérios de cálculos mecânicos de tubulações” recomenda na Tabela A.8 abaixo a espessura mínima para o diâmetro das tubulações.

Tabela A.8: Espessura mínima admissível para tubulações de aço carbono.

Diâmetro nominal	Espessura mínima
1/2” a 1 1/2”	Sch 80
2” a 6”	Sch 40

O item 7.4.d da N-1673 (1985) recomenda que se considere de “60°C a temperatura dos fluidos para todas as tubulações expostas ao sol”.

Com relação à flexibilidade das tubulações a norma recomenda que “a flexibilidade das tubulações deve ser conseguida por traçado não retilíneo adequado, devendo-se evitar o emprego de juntas de dilatação.”

A norma Petrobras N-1693 (1998) que trata dos “Critérios para padronização de material para tubulações” recomenda, segundo a Tabela A.9, os seguintes materiais para a seleção dos tubos de aço carbono.

Tabela A.9: Seleção de tubos de aço carbono.

Aplicação típica	Diâmetro nominal	Especificação básica	Alternativa
Tubulações de água	1/ 2” a 10”	API 5L Gr B	ASTM A 106 Gr B
Hidrocarbonetos vapor com T-400 °C	ou 1/ 2” a 10”	API 5L Gr B	ASTM A 106 Gr B

O item 5 do N-1693 (1998) trata dos **flanges** e recomenda que preferencialmente devem ser forjados “para acoplar flanges de aço com ferro fundido deve-se usar flanges de aço de classe 150# e 300#, com face plana”.

O item 5.3 da N-1693 (1998) trata das **extremidades dos flanges** e recomenda que “os flanges de diâmetro nominal de 2” e maiores devem ser tipo pescoço com espessura igual ao do tubo a que se destina. Os flanges de diâmetro nominal menor ou igual a 1/ 2” devem ser de solda de encaixe ou roscados”.

O item 5.4 da N-1693 (1998) trata da **face dos flanges** e recomenda que “para flanges de aço utilize-se a face ressalto, enquanto que a face plana é utilizada para faces de ferro fundido ou para flanges de aço ANSI B6.5 e classe de 150# 300#.

O item 6 da N-1693 (1998) trata dos **parafusos e porcas** e recomenda que “para parafusos integralmente roscados, porcas hexagonais, série pesada. Para atmosferas com salinidade dever ser cadmiados e bicromatizados”.

A norma Petrobras N-57 (1994) trata do “Projeto mecânico de tubulações industriais” e recomenda a **temperatura máxima** de utilização para materiais de tubulações, conforme Tabela A.10 abaixo.

Tabela A.10: Temperatura limite do material.

Material	Temperatura limite (°C)
Aço-carbono não acalmado (A-53, API 5L)	400
Aço-carbono acalmado, com Si (A-106)	430

d) Relação das linhas do processo.

A especificação das linhas de processo seguiu orientação da Norma PETROBRAS/N-1522 e estão descritas na tabela A.11.

Tabela A.11. Lista de linhas da Unidade de Tratamento de Água Oleosa (UT-MDIF) conforme Fluxograma de Engenharia (Anexo 7).

item	Identificação da linha					Serviço		Localização	
	Diâmetro nominal	Fluido (Símbolo)	Área	Nº de ordem	Padronização material	descrição	V ou L	Extremidades	
								De	Para
01	4"	AO	3404.09	001	B	Água	L	SAO	Ø1
02	2"	AO	3404.09	002	B	Água	L	Ø1	MDIF
03	3"	HC	3404.09	003	B	Org.	L	V-01	Ø2
04	2"	HC	3404.09	004	B	Org.	L	Ø2	MDIF
05	2"	HC	3404.09	005	B	Org.	L	2"-HC-004-B	2"-AO-002-B
06	2"	HC	3404.09	006	B	Org.	L	2"-HC-004-B	2"-AO-009-B
07	2"	HC	3404.09	007	B	Org.	L	2"-HC-004-B	3"-HC-003-B
08	2"	HC	3404.09	008	B	Org.	L	V-01	2"-AO-011-B
09	2"	AO	3404.09	009	B	Água	L	T-01	SAO
10	2"	AO	3404.09	010	B	Água	L	2"-AO-009-B	2"-AO-011-B
11	2"	AO	3404.09	011	B	Água	L	T-01	SAO
12	2"	HC	3404.09	012	B	Org.	L	T-01	V-01

AO:Água oleosa; HC: hidrocarbonetos. Org: orgânico.

e) Relação de válvulas utilizadas no processo

A especificação das válvulas utilizadas na Unidade de Tratamento de Água Oleosa (UT-MDIF) seguiu orientação da norma PETROBRAS N-76 (Tabela A.12).

Tabela A.12. Lista de válvulas utilizadas na UT-MDIF.

Item	Quantidade	Fluido	Descrição
01	01	HC	Válvula esfera, 4", 150 psi, Extremidade flange, face ranhurada, Corpo de AFU ASTM A216, Gr WCBo obturador-sede AISI 304.
02	02	HC	Válvula esfera, 3", 150 psi, Extremidade flange, face ranhurada, Corpo de AFU ASTM A216, Gr WCBo obturador-sede AISI 304.
03	12	HC	Válvula esfera, 2", 150 psi, Extremidade flange, face ranhurada, Corpo de AFU ASTM A216, Gr WCBo obturador-sede AISI 304.
04	09	HC	Válvula esfera, 3/4", 800 psi, Extremidade solda, Corpo de AFO ASTM A105, Gr WCBo obturador-sede AISI 304.
05	02	HC	Válvula esfera, 1/2", 800 psi, Extremidade solda, Corpo de AFO ASTM A105, Gr WCBo obturador-sede AISI 304.
06	01	HC	Válvula globo, 2", 150 psi, Extremidade flange, face ranhurada, Corpo de AFU ASTM A216, Gr WCBo obturador-sede AISI 304.
07	01	HC	Válvula Retenção, tipo portinhola, 2", 150 psi, Extremidade flange, face ranhurada, Corpo de AFU ASTM A216, Gr WCBo obturador-sede AISI 304
08	01	AO	Válvula esfera, 4", 150 psi, Extremidade flange, face ranhurada, Corpo de AFU ASTM A216, Gr WCBo obturador-sede bronze ASTM B2.
09	13	AO	Válvula esfera, 2", 200 psi, Extremidade rosca, Corpo de bronze ASTM B2, obturador-sede bronze ASTM B2.
10	06	AO	Válvula esfera, 3/4", 200 psi, Extremidade rosca, Corpo de bronze ASTM B2, obturador-sede bronze ASTM B2.
11	02	AO	Válvula esfera, 1/2", 200 psi, Extremidade rosca, Corpo de bronze ASTM B2, obturador-sede bronze ASTM B2.
12	01	AO	Válvula globo, 2", 200 psi, Extremidade rosca, Corpo de bronze ASTM B2, obturador-sede bronze ASTM B2.
13	02	AO	Válvula Retenção tipo portinhola, 2", 200 psi, Extremidade rosca, Corpo de bronze ASTM B2, obturador-sede ASTM B2.

2.5.5. Fluxogramas de Processo e de Engenharia.

Costa (1999) lembra que os **fluxogramas de engenharia** devem conter: informação mecânica dos equipamentos; numeração de linhas; instrumentos; set-point das psvs; todas as válvulas; desenho se m escala e simbologia normalizada. O autor ressalta que os **fluxogramas de processo** devem conter: TAGs dos equipamentos; tabela com informação sobre entalpia, vazão, pressão, temperatura, fluido, densidade, diâmetro da linha, instrumentos de controle, indicação de principais linhas e desenho sem escala. Os fluxogramas de Processo e de Engenharia são apresentados nos Anexos 6 e 7, respectivamente.

a) Balanço material

O balanço material das principais correntes dos processos, indicados no **fluxograma de processo**, está apresentado na Tabela A.13. Para tanto se utilizou a vazão correspondente à vazão efetiva média do aparelho.

Tabela A.13. Balanço material das principais correntes do processo do MDIF.

Variável	Corrente 1	Corrente 2	Corrente 3	Corrente 4
Vazão do orgânico (m ³ /h)	-	3,3	3,3	-
Vazão de água oleosa (m ³ /h)	10,3	-	-	-
Vazão de água tratada (m ³ /h)	-	-	-	10,3
Vazão efetiva (m ³ /h)	10,3	3,3	3,3	10,3
Vazão mássica (kg/h)	10.320,6	2.451,9	2.451,9	10.320,6
Densidade (kg/cm ³)	1002	743	743	1002
Viscosidade (cP)	0,851	0,907	0,907	0,851
Temperatura (°C)	30	30	30	30
Pressão (kgf/cm ²)	1,5	1,5	0,2	0,2
Estado físico	L	L	L	L

2.5.6. Detalhamento dos equipamentos componentes da UT-MDIF

A Unidade de Tratamento de Água Oleosa (UT-MDIF) é composta de cinco equipamentos:

- a. T-3404.09-01: Misturador-decantador à inversão de fases (MDIF). Tem por finalidade tratar a água oleosa oriunda da entrada do Separador Água/Óleo (SAO-533401) utilizando como extratante o orgânico denominado de Aguarrás;
- b. V-3404.09-01: Vaso acumulador do orgânico: Tem por finalidade acumular todo o inventário do orgânico para a partida da Unidade de Tratamento e servir como acumulador de orgânico em operação continuada até sua completa saturação em óleo;
- c. MT-3404.09-01: Misturador da T-3404.09-01: Objetiva dispersar mutuamente as fases e favorecer a transferência de massa do óleo da fase aquosa para o extratante;
- d. B404.09-01: Bomba do aquoso: tem por finalidade bombear a água oleosa do SAO-533401 para o topo da T-3404.09-01;
- e. B404.09-02: Bomba do orgânico: bombear o orgânico do V-0-3404.09-01 para o topo da T-3404.09-01.

2.5.6.1. Vaso Acumulador de orgânico (V-3404.09-01)

O vaso acumulador de orgânico tem a finalidade de armazenar todo o inventário de orgânico a ser utilizado na partida da unidade e possibilitar a separação da eventual água arrastada durante a operação contínua do processo do MDIF. Este volume pode ser saturado em até 15% V/V em óleo (CHIAVENATO, 1999).

O volume útil do vaso acumulador é 80% do volume total, sendo 20% do volume total reservado ao vapor. Calcula-se o volume útil somando-se os volumes ocupados pelo orgânico no MDIF e nas linhas, acrescentando-se cerca de 50% deste com perdas por vazamento, evaporações, drenos, arrastes ou problemas no processo.

O vaso acumulador de orgânico, também construído em fibra de vidro estrutural, com diâmetro de 2,5m e altura de 3,06m tem capacidade volumétrica total de 15 m³. Assim sendo, seu volume útil é de 12 m³.

2.5.6.2. Misturador (MT-3404.09-01)

Para promover a dispersão das fases está utiliza-se o misturador MT-3404.09-01 dotado de motor com potência de 5,0cv. Acoplado ao motor está instalado um Inversor de Frequência que controla a rotação deste. O motor WEG foi projetado para trabalhar com baixas velocidades de agitação.

2.5.6.3. Bomba do Aquoso (B-3404.09-01)

A Bomba do Aquoso (B3404.09-01) é de cavidade progressiva, marca Netzsch, com vazão máxima de 12,0 m³/h e Altura manométrica total (AMT) de 50m. A potência instalada é de 7,5cv. Acoplado ao motor está instalado um Inversor de Frequência que controla a rotação desta e, conseqüentemente, a vazão de água oleosa para a UT-MDIF.

2.5.6.4. Bomba do Orgânico (B-3404.09-02)

A Bomba do Orgânico (B3404.09-02) é de cavidade progressiva, marca Netzsch, com vazão máxima de 5,0 m³/h e Altura manométrica total (AMT) de 50m. A potência instalada é de 5,0cv. Acoplado ao motor está instalado um Inversor de Frequência que controla a rotação desta e, conseqüentemente, a vazão do orgânico para o MDIF.

2.5.6.5. Instrumentação, automação e controle da unidade

A instrumentação, automação e controle do processo da UT-MDIF é supervisionado por um Controlador Lógico Programável (PLC) localizado no container de apoio, próximo à UT-MDIF. O controlador recebe as informações dos instrumentos de campo, processa e envia informações ou ações de monitoração e controle.

A Matriz de Intertravamento do processo está apresentada na Tabela A.14, com suas respectivas causas e efeitos.

Tabela A.14. Matriz de Intertravamento do processo da UT-MDIF.

Causas/Efeitos	Parar B-01	Parar B-02	Fechar LV-01	Fechar LV-02	Parar MT-01
Nível ultra-baixo V-01	X	X	X	X	X
Nível ultra-alto V-01	X	X	X	X	X
Pressão muito alta B1	X				
Pressão muito alta B2		X			
Nível ultra-alto câmara de mistura	X	X			X
Nível ultra-baixo câmara de separação			X		
Parada de Emergência	X	X	X	X	X

2.5.6.6. Dados dos Instrumentos de monitoração, medição e controle

A lista de instrumentos que compõem a UT-MDIF está apresentada na Tabela A.15 com sua localização no processo e função principal.

Tabela A.15. Lista de instrumentos de monitoração, medição e controle do MDIF.

Identificação	Localização	Função
LT-01	T-01	Transmissor de nível de interface da câmara separação
LIC-01	PLC	Controlador de nível de interface da câmara de separação
LT-02	T-01	Transmissor de nível do orgânico da câmara de mistura
LIC-02	PLC	Controlador de nível do orgânico da câmara de mistura
LV-01	2"-AO-009-B	Válvula de nível de interface da câmara separação
LV-02	2"- HC-012-B	Válvula de nível do orgânico da câmara de mistura
LSHH-01	T-01	Chave de nível muito alto de interface água/orgânico.
LSLL-01	T-01	Chave de nível muito baixo de interface água/orgânico.
LSHH-02	T-01	Chave de nível muito alto de orgânico na câmara de mistura
LSLL-02	T-01	Chave de nível muito baixo de orgânico na câmara de mistura
LSHH-03	V-01	Chave de nível muito alto de orgânico no V-01.
LSLL-03	V-01	Chave de nível muito baixo de orgânico no V-01.
LG-01	T-01	Visor de nível de interface água/orgânico da câmara de separação.
LG-02	T-01	Visor de nível de orgânico da câmara de mistura.
LG-03	V-01	Visor de nível de orgânico do V-01.
PSHH-01	Descarga B1	Chave de pressão muito alta na descarga da B1.
PSHH-02	Descarga B2	Chave de pressão muito alta na descarga da B2.
PI-01	Descarga B1	Indicador de pressão da descarga da B1.
PI-02	Descarga B2	Indicador de pressão da descarga da B2.
FT-01	2"-AO-002-B	Transmissor de fluxo de água oleosa para MDIF.
FIC-01	PLC	Controlador de fluxo de água oleosa para MDIF.
FT-02	2"-HC-004-B	Transmissor de fluxo de orgânico para o MDIF.
FIC-02	PLC	Controlador de fluxo de orgânico para o MDIF.

A Figura A.5 apresenta um esquema simplificado da UT-MDIF onde se observam os principais equipamentos. No detalhe observam-se os equipamentos componentes da coluna e da unidade, bem como o SAO (representado em marrom).

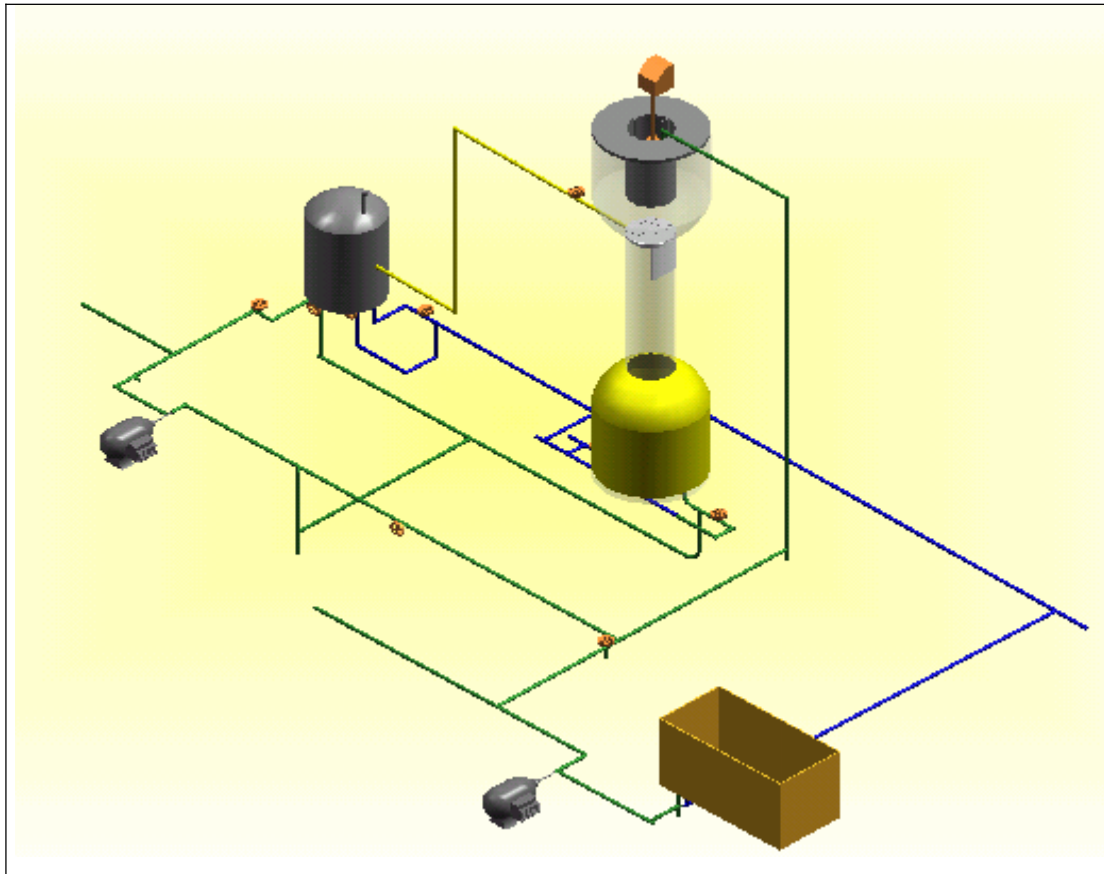


Figura A.5. Esquema simplificado da UT-MDIF.

ANEXO 3

3. Parte da tabela de pontos de percentagem da distribuição F, 5%.

Tabela A.16. Extrato da tabela de pontos de percentagem da distribuição F, 5%.

(fonte: Bros Neto; Scarmínio; Bins, 2001)

V_2/V_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77

ANEXO 4

4. Comparativo entre artigos de planejamento experimental

A tabela A.17 é assim descrita:

- a) coluna 1: Autores dos artigos analisados;
- b) coluna 2: coeficiente de regressão da equação do modelo;
- c) coluna 3: Valor P do coeficiente de regressão da variável independente ou da interação;
- d) coluna 4: Efeito estimado, calculado pela razão entre os efeitos estimados e seus respectivos desvios padrões;
- e) coluna 5: Razão entre o efeito do fator calculado pelo programa Statistica e o valor do fator tabelado ao nível de 95% ($F_{1,n-p}$).

Tabela A.17. Comparativo entre artigos de planejamento experimental e o planejamento do MDIF.

Autores	R^2	Valor P	Efeito estimado (valor absoluto)	Fcal/Ftab
Andrade et al,1991.	0,9852	$\leq 0,80$	$\geq 0,30$	$\geq 0,0143$
Schweitz & Bruno apud Bros et al, 2001	0,9531	$\leq 0,60$	$\geq 0,58$	$\geq 0,0645$
Binhara-Salum,1997	0,83077	$\leq 0,13$	$\geq 1,50$	$\geq 0,5696$
Vasconcelos et al, 2000	0,84938	$\leq 0,48$	$\geq 0,70$	$\geq 0,1148$
Neves, 2000.	0,97421	$\leq 0,16$	$\geq 1,40$	$\geq 0,4951$
Avelino et al, 1999	0,8255	$\leq 0,77$	$\geq 0,29$	$\geq 0,0174$
Linko et al, 1993	0,96328	$\leq 0,78$	$\geq 0,29$	$\geq 0,0150$
Fernandes Jr, 2002	0,98981	$\leq 0,67$	$\geq 0,47$	$\geq 0,0283$

ANEXO 5

FICHA TÉCNICA DO MATERIAL DA FIBRA DE VIDRO ESTRUTURAL

HEMFIBRA TECNOLOGIA EM SANEAMENTO LTDA
GERÊNCIA TÉCNICA
DEPTO DE PRODUÇÃO

ESPECIFICAÇÃO DA LAMINAÇÃO

1 – TANQUE DE ARMAZENAMENTO

Liner: Composto por um véu de poliéster (35g/m²), e três mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina estervínlica HETRON 922.

Estrutura do cilindro: Composta por mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

Estrutura do fundo e do tampo: Composto por fios de fibra de vidro picados impregnados com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0 pelo processo spray-up.

Pintura externa: Em gel-coat feito com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

2 – CÂMARA DE SEPARAÇÃO 1

Liner: Composto por um véu de poliéster (35g/m²), e três mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina estervínlica HETRON 922.

Estrutura do corpo e do fundo: Composta por mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

Estrutura do tampo abaulado: Composto por fios de fibra de vidro picados e impregnados com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0, pelo processo spray-up.

Pintura externa: Em gel-coat feito com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

3 – CÂMARA DE SEPARAÇÃO 2

Liner: Composto por um véu de poliéster (35g/m²), e três mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina estervínlica HETRON 922.

Estrutura do corpo: Composta por mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

Estrutura do fundo abaulado: Composto por fios de fibra de vidro picados e impregnados com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0, pelo processo spray-up.

Pintura externa: Em gel-coat feito com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

4 - COLUNAS

Liner: Composto por um véu de poliéster (35g/m²), e três mantas de fibra de vidro com 450g/m², impregnadas com resina esterevinílica HETRON 922.

Estrutura: composto por fios de fibra de vidro contínuos, impregnados com resina poliéster insaturado, isoftálica, ARAZYN 11.0, pelo processo de enrolamento filamantar, (filament winding).

Pintura externa: Em gel-coat feito com resina poliéster insaturado, isoftálica, média reatividade, ARAZYN 11.0.

5 - ANÉIS DE BORRACHA DAS FLANGES

Foram fornecidos os anéis de borracha das flanges diâmetro 600mm e das visitas com vidro, todos em borracha nitrílica.

6 - VISORES

Fornecidos em vidro temperado com 6mm de espessura

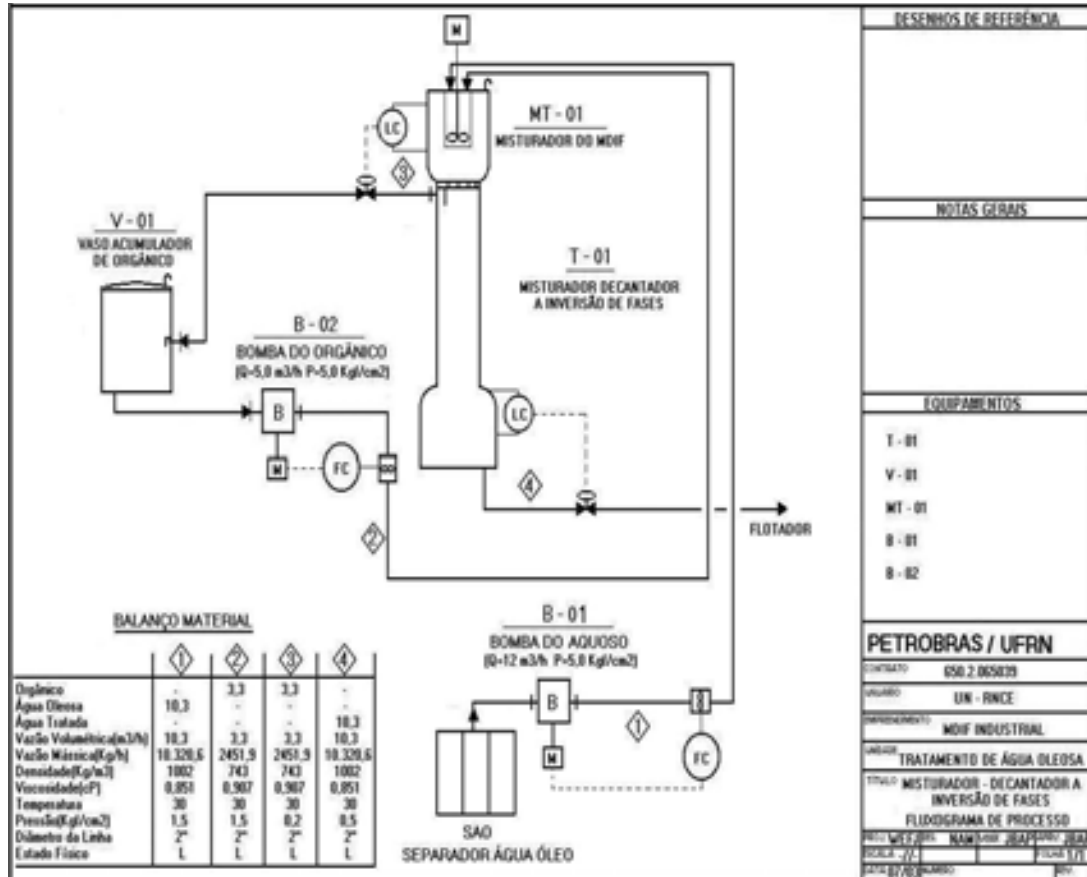
São Gonçalo do Amarante, 15 de dezembro de 2003.


Osvaldo Luiz Fusinato
Coordenado de Produção

Osvaldo L. Fusinato
Eng. Mec. CRQ-50.21571-1

ANEXO 6

6. FLUXOGRAMA DE PROCESSO DA UNIDADE DE TRATAMENTO DE EFLUENTES (UT-MDIF)



ANEXO 7

7. FLUXOGRAMA DE ENGENHARIA DA UNIDADE DE TRATAMENTO DE EFLUENTES – UT-MDIF

