



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



**SEPARAÇÃO DE LEVEDURAS DO VINHO FERMENTADO  
ATRAVÉS DE DOIS HIDROCICLONES COMERCIAIS DE 10  
MILÍMETROS.**

Uberlândia – MG

2014



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



**SEPARAÇÃO DE LEVEDURAS DO VINHO FERMENTADO  
ATRAVÉS DE DOIS HIDROCICLONES COMERCIAIS DE 10  
MILÍMETROS.**

**André Arcelo Pinto**

**Orientadores:**

**Carlos Henrique Ataíde**

**Cláudio Roberto Duarte**

**Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

P659s      Pinto, André Arcelo, 1981-  
2016      Separação de leveduras do vinho fermentado através de dois  
hidrociclones comerciais de 10 milímetros / André Arcelo Pinto. - 2016.  
120 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde.

Coorientador: Cláudio Roberto Duarte.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1143>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Hidrociclone - Teses. 3. Levedos -  
Teses. 4. Solução (Química) - Teses. I. Ataíde, Carlos Henrique, . II.  
Duarte, Cláudio Roberto, . III. Universidade Federal de Uberlândia.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

---

CDU: 66.0

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262

UBERLÂNDIA – MG

2014

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 31 DE JANEIRO DE 2014.

BANCA EXAMINADORA



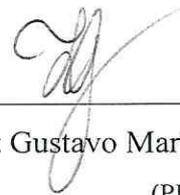
Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde

Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte

Coorientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira

(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

(FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Marcelo Fonseca Xavier

(UNIUBE)

*“Cada dia que amanhece assemelha-se a uma página em branco na qual gravamos nossos pensamentos, ações e atitudes. Na essência, cada dia é a preparação do nosso próprio amanhã.”(Francisco C. Xavier)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, e acima de tudo, a Deus por me proporcionar todas as condições para a realização desse trabalho e também pela sua presença constante em minha vida.

Aos meus pais, pelo esforço incondicional, deixando muitas vezes de lado os seus sonhos para a realização dos meus.

Aos meus queridos Pedro e Larissa, pela felicidade transmitida no dia a dia e por me trazer inspiração nos momentos mais difíceis.

A minha irmã Adriana pelo apoio e orações para que eu chegasse ao final dessa caminhada.

Ao professor, orientador e, acima de tudo, amigo Carlos Henrique Ataíde pela confiança depositada, pela paciência e compreensão, sendo um exemplo de dedicação e profissionalismo. Agradeço da mesma forma a Isabele pelos ensinamentos e pelo grande esforço para realização desse trabalho, sem sua ajuda seria impossível de se finalizar mais essa etapa. Tenho orgulho de falar que faço parte dessa equipe.

Aos “avós” do Pedro, Célio e Marlene, pela ajuda nos momentos difíceis, me acolhendo como se fossem meus pais. A vocês todo o meu carinho e gratidão.

Aos meus amigos Ricardo, Gustavo e Giovani pelo apoio e incentivo no trabalho, estando presentes em todos os momentos.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Química

Aos membros da banca, *prof. Dr. Marcelo Xavier, prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira* e ao *prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva* pelo enriquecimento desse trabalho.

## SUMÁRIO

➤ .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	v
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 Produção de Etanol .....	5
2.2 Hidrociclones como uma nova alternativa para o processo de separação das leveduras após o processo fermentativo. ....	6
2.2.3 Análise Granulométrica .....	10
2.2.4 Números Adimensionais Relevantes .....	11
2.2.5 Eficiência de Separação Sólido Líquido .....	12
2.2.6 Razão de Líquido ( $R_L$ ) .....	12
2.2.7 Eficiência Total ( $\eta$ ) .....	13
2.2.8 Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ ) .....	13
2.2.9 Eficiência Granulométrica .....	13
2.2.10 Eficiência Granulométrica Reduzida .....	14
2.2.10 Efeito <i>Fish Hook</i> em Hidrociclones .....	15
2.2.11 Teorias Clássicas de Separação Sólido Líquido em Hidrociclones .....	16
Teoria da Órbita de Equilíbrio .....	16
Teoria do Tempo de Residência .....	17
Teoria populacional .....	19
Teoria do Escoamento Bifásico Turbilhonar .....	20
2.3 Configuração de Hidrociclones em Série .....	20
2.4 O agente de fermentação alcoólica .....	23
2.4.1 Sedimentação Floculenta e Leveduras Inteligentes .....	24
2.5 Centrífugas Industriais .....	25

2.5.1 Centrífugas Filtrantes .....	25
2.5.2 Centrífugas de Sedimentação .....	26
2.5.3 Centrífugas de Disco .....	26
2.6 Vinho Fermentado (mosto fermentado) .....	28
2.7 Planejamento Experimental.....	29
2.8 Viabilidade Celular.....	30
2.9 Câmara de Neubauer .....	31
2.10 Trabalhos Reportado na Literatura sobre a Separação de Microrganismos em Hidrociclones .....	33
CAPÍTULO 3. Materiais e Métodos .....	39
3.1 Materiais .....	39
3.1.1 Hidrociclones Utilizados no Processo de Separação .....	39
3.1.2 Hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A.....	39
3.1.3 Hidrociclone o AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21.....	40
3.1.4 Vinhos Fermentados .....	42
3.1.5 Unidade Experimental .....	45
3.2 Planejamento de Experimentos .....	46
3.2.1 Planejamento de Experimentos para o Hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A.....	47
3.2.2 Planejamento de Experimentos Hidrociclone AKW <sup>®</sup> Tipo RWK.....	48
3.3 Procedimento Experimental .....	49
3.3.1 Cálculo das Concentrações Mássicas de Alimentação e de <i>Underflow</i> .....	51
3.3.3 Cálculo das Variáveis de Desempenho dos Hidrociclones .....	52
3.3.4 Configuração de Hidrociclones em Série .....	52
3.4 Análise da Viabilidade Celular.....	53
3.5 Eficiência Granulométrica.....	55
CAPÍTULO 4. Resultados e Discussão .....	57
4.1 Estudo da Influência das Variáveis Operacionais e Geométricas no Desempenho de Hidrociclones.....	57

4.2 Resultados dos Hidrociclones Individuais.....	57
4.2.1 Hidrociclone Doxie <sup>®</sup> tipo A .....	57
Vazão Mássica de Entrada(Capacidade) .....	58
Eficiência Total de Separação .....	61
Razão de Líquido.....	63
Eficiência Total Reduzida .....	66
Análise da Viabilidade Celular Utilizando o Hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A Operando Individualmente. ....	68
4.2.2 Hidrociclone AKW <sup>®</sup> Tipo RWK 21 .....	69
Vazão Mássica de Entrada.....	70
Eficiência Total de Separação .....	72
Razão de Líquido.....	75
Eficiência Total Reduzida .....	77
Eficiência Granulométrica para o Hidrociclone AKW <sup>®</sup> Tipo RWK 21 .....	79
Análise de Viabilidade Celular do Hidrociclone AKW <sup>®</sup> Tipo RWK 21 .....	81
4.3 Hidrociclones Operando em Série .....	82
4.3.1 Hidrociclone Doxie <sup>®</sup> tipo A Operando em Série .....	82
4.4.2 Análise da Queda de Viabilidade Celular Utilizando o Hidrociclone <sup>®</sup> Doxie tipo A Operando em série .....	83
4.4.3 Hidrociclone AKW <sup>®</sup> Tipo RWK 21 Operando em Série.....	83
4.4.4 Análise da Queda de Viabilidade Celular Utilizando o Hidrociclone AKW <sup>®</sup> RWK 21 Operando em Série .....	84
4.5 Comparação dos Resultados do Hidrociclone Doxie <sup>®</sup> Tipo A e do Hidrociclone AKW <sup>®</sup> Tipo RWK 21(AKW X Doxie <sup>®</sup> ). ....	84
4.6 – Comparação entre os Hidrociclones e as Centrífugas Industriais. ....	85
CAPÍTULO 5. Conclusões e Sugestões.....	87
APENDICE 1 .....	89

Tabela A.1.1 – Distribuição granulométrica para o experimento primeiro ensaio considerando o planejamento de experimento. da Tabela 3.6.....	89
Tabela A.1.2 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o primeiro experimento de acordo com a Tabela 3.6 .....	90
Tabela A.1.3 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o segundo experimento de acordo com a Tabela 3.6.....	90
Tabela A.1.4 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o terceiro experimento de acordo com a Tabela 3.6.....	91
Tabela A.1.5 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o quinto experimento de acordo com a Tabela 3.6.....	91
Tabela A.1.6 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o quarto experimento de acordo com a Tabela 3.6.....	92
Tabela A.1.7 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o sexto experimento de acordo com a Tabela 3.6.....	92
Tabela A.1.8 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o sétimo experimento de acordo com a Tabela 3.6 .....	93
Tabela A.1.9 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o oitavo experimento de acordo com a Tabela 3.6 .....	93
Tabela A.1.10 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o nono experimento de acordo com a Tabela 3.6 .....	94
Tabela A.1.11 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o décimo experimento de acordo com a Tabela 3.12 .....	94
Tabela A.1.12 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o décimo primeiro experimento de acordo com a Tabela 3.12.....	95
Tabela A.1.13 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o décimo segundo experimento( configuração em série), de acordo com a Tabela 3.12. ....	95
APÊNDICE 2 .....	96

A.2.1 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 2,3 e 4 para o hidrociclone AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21 de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6.....	96
A.2.2 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 5,6 e 7 para o hidrociclone AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21. de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6.. .....	96
A.2.3 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 8,9 e 10 para o hidrociclone AKW RWK 21 de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6. ....	97
A.2.4 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 8,9 e 10 para o hidrociclone AKW tipo RWK 21 de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6, e também considerando a .configuração em série.....	97
3.1.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na capacidade do hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A. ....	98
3.1.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	98
A.3.2.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na razão de líquido do hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A. ....	99
A.3.2.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	99
A.3.3.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na eficiência total de separação do hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A.....	100
A.3.3.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	100
A.3.4.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na eficiência total de separação reduzida do hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A. ....	101
A.3.4.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	101
APÊNDICE 4 .....	102

A.4.1.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na capacidade do hidrociclone AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21. ....	102
A.4.1.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	102
A.4.2.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influencia na razão de líquido do hidrociclone AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21. ....	103
A.4.2.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	103
A.4.3.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influencia na eficiência total de separação do hidrociclone AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21. ....	104
A.4.3.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	104
A.4.4.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influencia na eficiência total reduzida de separação do hidrociclone AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21.....	105
A.4.4.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de <b>p = 0,05</b> .....	105
ANEXO 1 .....	106
A.6.1 – Sistema de aquisição de dados.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma de Produção de Etanol .....	2
Figura 2.1 - Representação da geometria de um hidrociclone .....	7
Figura 2.2 - Movimentos Rotacionais Desenvolvidos por Hidrociclones.....	8
Figura 2.3 - Curva de Partição Onde se Observa do Efeito “Fish Hook” nas partículas menores.....	15
Figura 2.4 - Forças que atuam sobre a partícula.....	16
Figura 2.5 - Perfil de velocidade vertical dentro do hidrociclone. ....	17
Figura 2.6 - Vista superior de um hidrociclone (Alves 2006). ....	18
Figura 2.7 - Dois hidrociclones em série usados em processos de clarificação .....	21
Figura 2.8 - Configuração de hidrociclones em série para o processo de espessamento. ....	21
Figura 2.9 - Dois hidrociclones em série onde o underflow do segundo estágio é reciclado, para o processo de espessamento e clarificação ao mesmo tempo.....	22
Figura 2.10 - Arranjo com três hidrociclones para clarificação e espessamento, para alimentações diluídas.....	23
Figura 2.11 - Fermentação utilizando leveduras flocculentas (Soares, 2010).....	25
Figura 2.12 - Representação esquemática de um corte transversal de uma centrífuga de discos. .....	27
Figura 2.13 - Células azuis (mortas) células transparentes (vivas) (BICALHO, 2012). ....	31
Figura 2-14: Câmara de Neubauer (LUCARINI <i>et. al.</i> , 2011).....	32
Figura 2-15: Quadrantes da câmara de Neubauer. ....	32
Figura 3.1 - Vista externa e interna do hidrociclone Doxie tipo A. ....	39
Figura 3.2 - Válvula do tipo “agulha”. ....	39
Figura 3.3 - Dimensões do hidrociclone utilizado nos experimentos. ....	40
Figura 3.4 - Partes do Hidrociclone AKW RKW 21.....	41
Figura 3.5 - Vista lateral do hidrociclone AKW RKW 21. ....	41
Figura 3.6 - Corte transversal do hidrociclone AKW® RWK 21 com suas dimensões.....	41
Figura 3.7 - Análise granulométrica utilizando modelo RRB. ....	43
Figura 3.8 - Análise granulométrica utilizando o modelo Sigmóide.....	44
Figura 3.9 - Vinho fermentado usina Uberaba. ....	44
Figura 3.10 - Escopo da Unidade Experimental.....	46
Figura 3.11 - Amostra de mosto fermentado antes da centrifugação. ....	51

Figura 3.13 - Amostra mosto fermentado após o processo de centrifugação.....	51
Figura 3.14 - Configuração em série para hidrociclones operando em série (SVAROVSKY, 2000 Adaptado). .....	53
Figura 3.15 - Esquema simplificado da câmara de Neubauer. ....	55
Figura 3.16 - Células vivas (transparentes) células mortas (azuis). ....	55
Figura 4.1 - Vazão mássica do hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A durante os 11 experimentos....	58
Figura 4.2 - Análise de resíduos. ....	60
Figura 4.3 - Valores observados versus valores preditos. ....	60
Figura 4.4 - Superfície de resposta da capacidade.....	60
Figura 4.5 - Eficiência do hidrociclone Doxie A <sup>®</sup> tipo A durante os experimentos. ....	61
Figura 4.6 - Análise de resíduos para a resposta $\eta$ . ....	62
Figura 4.7 - Valores preditos versus valores observados para a resposta $\eta$ . ....	62
Figura 4-8: Superfície de resposta correspondente a eficiência total de separação.....	63
Figura 4.9 - Razões de Líquido encontradas durante os experimentos. ....	64
Figura 4.10 - Análise de resíduos para a Razão de Líquido. ....	65
Figura 4.11 - Valores preditos versus valores observados. ....	65
Figura 4.12 - Superfície e resposta correspondente a Razão de Líquido. ....	65
Figura 4.13 - Eficiências Totais reduzidas encontradas durante os experimentos. ....	66
Figura 4.14 - Análise residual para a resposta $\eta'$ . ....	67
Figura 4.15 - Valores preditos versus valores observados. ....	67
Figura 4.16 - Superfície de resposta para a Eficiência Total de Separação.....	68
Figura 4.17 - Vazões mássicas durante os experimentos. ....	70
Figura 4.18 - Análise de resíduos (AKW).....	71
Figura 4.19 - Valores Preditos versus Observados.....	71
Figura 4.20 - Superfície de resposta para a vazão mássica (hidrociclone AKW).. ....	72
Figura 4.21 - Eficiências totais de separação durante os experimentos (AKW). ....	72
Figura 4.22 – Análise residual para a resposta $\eta$ . ....	74
Figura 4.23 – valores preditos versus valores observados para a resposta $\eta$ .....	74
Figura 4.24 - Superfície de resposta para a eficiência total de separação (AKW). ....	74
Figura 4.25 - Gráfico da razão de Líquido ao longo dos 11 experimentos. ....	75
Figura 4.26 - Análise residual para $R_L$ . ....	76
Figura 4.27 - Valores Preditos X valores observados. ....	76
Figura 4.28 - Superfície de resposta para a razão de líquido (AKW). ....	77
Figura 4.29 - Eficiência total reduzida ao longo dos 11 experimentos. ....	77

Figura 4.30 - Análise residual para a eficiência total reduzida. ....	78
Figura 4.31 - Valores Preditos X valores observados. ....	78
Figura 4.32 - Superfície de resposta para eficiência total reduzida. ....	79
Figura 4-33: Análise granulométrica correntes de alimentação e de underflow. ....	80
Figura 4.34 - Gráfico da eficiência granulométrica X diâmetro da partícula. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relações geométricas de algumas famílias de hidrociclones.....	9
Tabela 2.2 - Tipos de centrífuga e suas características.....	26
Tabela 2.3 - Dados da operação de centrífugas de discos industriais (BICALHO, 2011). ....	28
Tabela 2.4 – Características do mosto fermentado de algumas usinas.....	29
Tabela 3.1 - Condições operacionais do hidrociclone AKW® RWK 21.....	40
Tabela 3.2 - Dados fornecidos pelas usinas Alvorada e Uberaba. ....	42
Tabela 3.3 - Níveis das variáveis do planejamento experimental. ....	47
Tabela 3.4 – Matriz de planejamento de experimentos para o Doxie® tipo A. ....	48
Tabela 4.1 - Resultados experimentais para o hidrociclone Doxie A® tipo A. ....	58
Tabela 4.2 - Resultados da regressão para a vazão mássica.....	59
Tabela 4.3 - Resultados da regressão para a eficiência total. ....	62
Tabela 4.4 - Resultados da regressão para a razão de líquido. ....	64
Tabela 4.5 - Resultados da regressão para a eficiência reduzida.....	67
Tabela 4.6 - Resultado da queda de viabilidade celular para o hidrociclone Doxie.....	69
Tabela 4.7 - Resultados experimentais para o planejamento 3 níveis com 2 fatores. ....	69
Tabela 4.8 - Resultados da regressão para a vazão mássica.....	70
Tabela 4.9 - Resultados da regressão para a eficiência total. ....	73
Tabela 4.10 - Resultados da regressão para a razão de líquido. ....	75
Tabela 4-11: Resultados da regressão para a eficiência reduzida .....	78
Tabela 4.12: Parâmetros do modelo RRB. ....	80
Tabela 4.13 - Resultados da Viabilidade Celular do Hidrociclone AKW® Tipo RWW 21.....	81
Tabela 4.14 – Resultados utilizando o Hidrociclone Doxie em série.....	82
Tabela 4.15 - Resultados da queda de viabilidade celular para configuração em série do hidrociclone Doxie® A tipo A .....	83
Tabela 4.16 - Desempenho de separação do hidrociclone AKW® tipo RWK 21 em série.....	83
Tabela 4.17 – Resultados da queda de viabilidade celular utilizando o hidrociclone AKW® RKW 21 operando em série.....	84
Tabela 4.18 - Hidrociclone Doxie® Tipo A X Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21.....	85
Tabela 4.19 – Configurações ótimas para ambos os hidrociclones.....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c_{V_a}$	– concentração volumétrica de sólidos na alimentação.....	[-]
$c_{V_u}$	– concentração volumétrica de sólidos no <i>underflow</i> .....	[-]
$c_{W_a}$	– concentração mássica de sólidos na alimentação.....	[-]
$c_{W_u}$	– concentração mássica de sólidos no <i>underflow</i> .....	[-]
$d_p$	– diâmetro da partícula .....	[L]
$d_{50}$	– diâmetro de corte.....	[L]
$d'_{50}$	– diâmetro corte reduzido.....	[L]
$D_{50}$	– parâmetro do modelo Sigmóide	
$D_a$	– diâmetro da alimentação do hidrociclone codificado .....	[-]
$D_c$	– diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone .....	[L]
$D_i$	– diâmetro do duto de alimentação .....	[L]
$D_o$	– diâmetro do <i>overflow</i> do hidrociclone .....	[-]
$D_u$	– diâmetro do <i>underflow</i> .....	[L]
$D_{63,2}$	– diâmetro parâmetro do modelo <i>Rosin – Rammler – Bennet</i> (RRB) .....	[L]
$Eu$	– número de Euler .....	[-]
$F_c$	– força centrífuga .....	[ML <sup>1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$G(d)$	– eficiência granulométrica .....	[-]
$G'(d)$	– eficiência granulométrica .....	[-]
$g$	– aceleração gravitacional .....	[LT <sup>-2</sup> ]
$K$	– constante característica para cada família de ciclone e/ou hidrociclone .....	[-]
$L$	– comprimento do hidrociclone .....	[L]
$L_l$	– comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone .....	[L]
$M_{lu}$	– massa da levedura úmida.....	[M]
$M_{[(b+t)_v]}$	– massa do tubo e do béquer vazio .....	[M]
$M_{[(b+t)_u]}$	– massa do conjunto béquer, tubo e vinho fermentado para as correntes de alimentação e <i>underflow</i> .....	[M]

$M_s$ – massa da solução .....	[M]
$m$ – parâmetro dos modelos de distribuição granulométrica .....	[-]
$n$ – constante característica para cada família de ciclone e/ou hidrociclone.....	[-]
$P_a$ – pressão de alimentação .....	[MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$P_u$ – pressão de <i>underflow</i> do hidrociclone .....	[MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]
$Q_A$ – vazão volumétrica de alimentação .....	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$Q_u$ – vazão volumétrica do <i>underflow</i> do hidrociclone .....	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
$r$ – raio da parte cilíndrica do hidrociclone.....	[L]
$R$ – raio da seção cilíndrica do hidrociclone .....	[L]
$Re$ – número de Reynolds .....	[-]
$R_L$ – razão de líquido .....	[-]
$Stk_{50}$ – número de Stokes.....	[-]
$u$ – velocidade axial simulada .....	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_c$ – velocidade superficial no corpo cilíndrico do hidrociclone .....	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_i$ – velocidade de entrada do fluido.....	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_\theta$ – velocidade tangencial .....	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_z$ – velocidade axial do fluido .....	[LT <sup>-1</sup> ]
$v$ – velocidade da suspensão no duto de alimentação.....	[LT <sup>-1</sup> ]
$v_r$ – velocidade da partícula na direção radial.....	[LT <sup>-1</sup> ]
$v_t$ – velocidade da partícula na direção tangencial.....	[LT <sup>-1</sup> ]
$W_a$ – vazão mássica da alimentação .....	[MT <sup>-1</sup> ]
$W_u$ – vazão mássica do <i>underflow</i> .....	[MT <sup>-1</sup> ]
$X_{(d)}$ – fração mássica da partícula na alimentação menor que certo diâmetro analisado .....	[-]
$X_{u(d)}$ – fração mássica da partícula na corrente de <i>underflow</i> menor que certo diâmetro analisado .....	[-]
$X_1$ – variável operacional codificada .....	[-]
$X_2$ – variável operacional codificada .....	[-]
$\rho$ – densidade da suspensão da alimentação .....	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$ – densidade da partícula .....	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_{C_2H_5OH}$ – densidade do etanol .....	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_u$ – densidade da suspensão do <i>underflow</i> .....	[ML <sup>-3</sup> ]

$\theta$ – ângulo do tronco de cone do hidrociclone .....	[-]
$\omega$ – velocidade angular .....	[LT <sup>-1</sup> ]
$\mu$ – viscosidade da suspensão .....	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\eta$ – eficiência total .....	[-]
$\eta'$ – eficiência total reduzida .....	[-]
$\eta_1$ – eficiência total obtida na primeira passagem pelo hidrociclone.....	[-]
$\eta_2$ – eficiência total obtida na segunda passagem pelo hidrociclone .....	[-]
$\Delta\rho$ – diferença entre as densidades do líquido e do sólido.....	[ML <sup>-3</sup> ]
$\Delta P$ – queda de pressão .....	[MT <sup>-2</sup> L <sup>-1</sup> ]

## RESUMO

Nas usinas sucroalcooleiras, após o processo fermentativo para produção de etanol nas dornas de fermentação, a suspensão de leveduras e soluções alcoólicas, chamada de vinho fermentado, são encaminhadas para as centrífugas para que se faça a separação das leveduras que são reaproveitadas no processo. Como esse equipamento, embora sendo eficiente, requer grandes custos de produção, manutenção e energia, novas alternativas vêm sendo pesquisadas para se realizar essa separação, sendo que uma delas é a utilização de hidrociclones. Devido a esses aspectos, o objetivo do presente trabalho foi comparar a separação das leveduras *Saccharomyces cerevisiae* presentes no vinho fermentado em dois hidrociclones comerciais das marcas Doxie<sup>®</sup> tipo A e AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21, individualmente e operando em série, comparando assim suas performances no que diz respeito ao processo de separação. As variáveis independentes selecionadas neste estudo foram: a pressão na alimentação dos hidrociclones, a pressão no *underflow* para o hidrociclone Doxie e o diâmetro do *underflow* para o hidrociclone AKW. Para se avaliar a performance desses dois hidrociclones foi realizado um planejamento fatorial ( $3^k$ ) e os resultados foram empregados para gerar correlações matemáticas com o intuito de descrever o comportamento da capacidade, razão de líquido, eficiência total de separação e da eficiência total reduzida. Foi avaliado também o desempenho dos hidrociclones utilizando a configuração em série, utilizando as configurações operacionais e geométricas do equipamento que apresentou as melhores respostas (capacidade, eficiência total de separação, razão de líquido e eficiência total reduzida). Com a utilização do hidrociclone Doxie obtiveram-se resultados de capacidade entre 209 a 267,67 kg/h, eficiências totais de 16,72 a 63,87%, eficiências totais reduzidas de 5,86 a 39,39%, razões de líquido de 11,54 a 40,39% e com queda de viabilidade celular de 4,84%. Já o hidrociclone AKW a capacidade foi entre os valores de 216 a 311 kg/h, eficiências totais de 62,36 a 97,79%, eficiências totais reduzidas de 23,08 a 88,27%, razões de líquido de 49,33 a 82,07% e com queda de viabilidade celular de 6,98%. Com a utilização dos hidrociclones em série houve um aumento substancial na eficiência total de separação. Foi possível verificar que o aumento da pressão de alimentação e a diminuição da pressão de *underflow*, considerando o hidrociclone Doxie, aumentou a eficiência de separação e a capacidade do equipamento, mas em contrapartida houve um aumento da razão de líquido. O hidrociclone AKW apresentou os maiores valores de eficiência total de separação utilizando a maior pressão de alimentação e o maior diâmetro de *underflow*.

**Palavras chave:** Hidrociclone, levedura, performance, vinho fermentado

## ABSTRACT

In plants of sugar industry, after the fermentation process to produce ethanol in the fermentation vats, the suspension of yeast and alcoholic solutions, called fermented wine, are forwarded to the centrifuges to make the separation of yeast that are reused in the process. This equipment, although efficient, requires large production costs, maintenance and energy, so new alternatives are being investigated to achieve this separation, one of which is the use of hydrocyclones. Due to these aspects, the aim of this study was to compare the separation of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* present in fermented wine in two commercial hydrocyclones, Doxie<sup>®</sup> type A e AKW<sup>®</sup> type RWK 21, operating individually and in series, thus comparing their performances concerning the separation process. The independent variables selected for this study were: pressure feed for both hydrocyclones, the *underflow* pressure for Doxie hydrocyclone and the *underflow* diameter for AKW hydrocyclone. To evaluate the hydrocyclones performance a factorial design ( $3^k$ ) was carried out and the results were used to generate a mathematical models to describe the behavior of capacity, ratio of liquid, total efficiency of separation and reduced total efficiency. After the experiments and data processing, it was found that the hydrocyclone AKW showed superior performance hydrocyclone Doxie. To evaluate the performance of the two hydrocyclones, a factorial design was carried out ( $3k$ ) and the results were used to generate mathematical models in order to describe the behavior of the capacity ratio of liquid total efficiency of separation and reduced overall efficiency. It was also rated the performance of hydrocyclones using the serial configuration, using the operational and geometric configurations of equipment that showed the best results (capacity, total efficiency of separation, liquid ratio and reduced total efficiency). The decrease of cell viability was performed by cell staining assessed using methylene blue. With the use of the hydrocyclone Dachshund obtained results in capacity between 209 to 267.67 kg / h total efficiency from 16.72 to 63.87 %, total efficiency reduced from 5.86 to 39.39 % liquid ratios 11.54 to 40.39 % and a decline of 4.84% viability. Have the hydrocyclone AKW capacity was between values 216-311 kg / h, total efficiencies from 62.36 to 97.79 %, reduced total efficiencies from 23.08 to 88.27 %, net of reasons to 49,33 to 82.07 % and a decrease of cell viability of 6.98 %. With the use of hydrocyclones in series, there was a substantial increase in overall separation efficiency. Analysis and discussion of results, we found that increasing the supply pressure and decreasing the pressure underflow, considering the hydrocyclone Doxie, increased separation efficiency, the ability of equipment, but in return there was an increase in the ratio of net. The AKW hydrocyclone showed the highest values of total efficiency and separation using higher boost pressure and larger diameter of underflow.

**Keywords:** Hydrocyclones, yeast, performance, fermented wine

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O etanol é o constituinte principal da cerveja, do vinho, da vodka, da cachaça, do licor e do álcool combustível para automóveis. Este álcool, além de ser encontrado em bebidas alcoólicas, no álcool combustível e na gasolina (como um aditivo) é muito empregado na indústria, na produção de perfumes, loções, anti-sépticos, como solvente químico, dentre outras aplicações.

O etanol ou álcool etílico pode ser obtido através da fermentação dos açúcares. Este é o método mais comum no Brasil, que utiliza a cana-de-açúcar para obter os açúcares que darão origem ao etanol. A fermentação é o processo inicial da formação de álcool etílico (etanol) a partir de açúcares. Esse processo consiste um conjunto de reações químicas, especificamente bioquímicas realizadas a partir de três fatores fundamentais: presença de açúcares, microrganismos que sejam capazes de transformar esse açúcar em etanol, dióxido de carbono e a ausência de oxigênio. Os microrganismos responsáveis por essas reações são as leveduras. Entre as leveduras, a utilizada para esse processo é a *Saccharomyces Cerevisiae* (BARBOSA *et al.*, 2010).

Na produção de etanol, a fermentação ocorre em tanques denominados dornas, onde os açúcares provenientes do caldo da cana-de-açúcar (extraído na etapa de moagem) são consumidos pela ação das leveduras. A produção de etanol pode ser dividida em três fases: o preparo do substrato, a fermentação e a destilação (WATANABE, 2006).

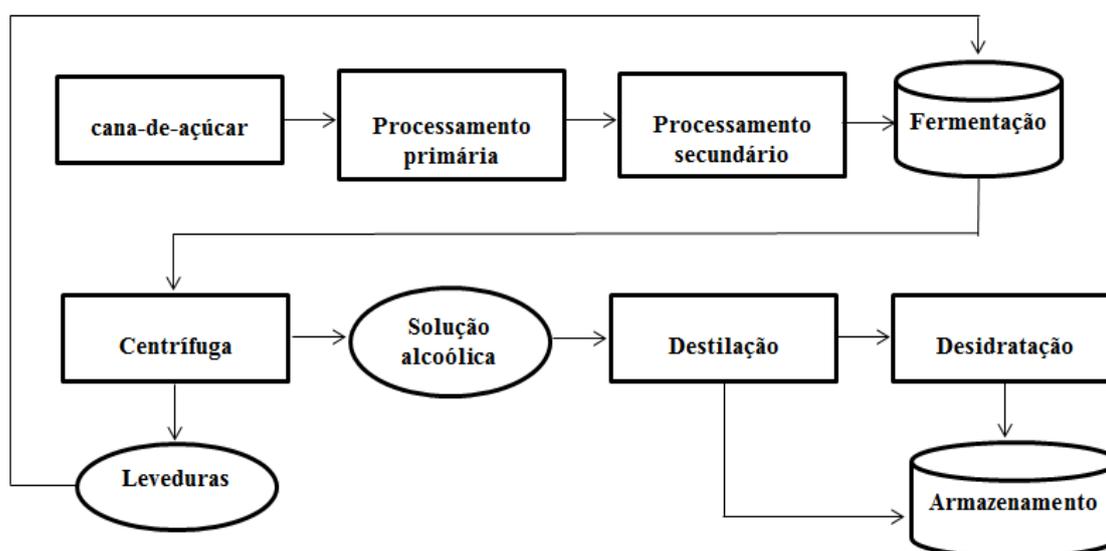
As matérias-primas indiretamente fermentescíveis não são fermentadas diretamente pelas leveduras, necessitando de um tratamento prévio, que consiste em um processo de hidrólise química ou enzimática do polissacarídeo, gerando açúcares menores, tais como o monossacarídeo glicose. Este processo aumenta o custo de produção do etanol a partir destas matérias primas. A matéria prima mais viável economicamente, considerando-se volume de produção, rendimento e custo advém da cana de açúcar.

Pode-se utilizar o caldo diretamente ou os melaços para a fermentação alcoólica. Como a maioria das usinas produz também o açúcar, utiliza-se na fermentação o melaço (resíduo da fabricação do açúcar) do qual já foi extraída a sacarose.

A seguir, o mosto é resfriado em trocadores de calor e enviado para a dorna de fermentação, o qual já contém o inóculo (fermento tratado reciclado das cubas de tratamento de fermento, proveniente de fermentações prévias). Após o enchimento da dorna, a fermentação continua até completar a conversão dos açúcares fermentescíveis, gerando etanol e dióxido de

carbono. O produto passa por vários fermentadores até estar completamente fermentado (LIMA *et. al.*, 2001)

O líquido efluente da etapa de fermentação, denominado vinho, é enviado às centrífugas para a posterior recuperação do fermento (leveduras). Este concentrado de leveduras recuperadas (também chamado de leite de levedura) irá retornar para as dornas de fermentação. Já o vinho de levedura do centrifugado é enviado às colunas de destilação (WATANABE, 2006). A Figura 1.1 apresenta um fluxograma simplificado do processo de produção de etanol.



**Figura 1.1 – Fluxograma de Produção de Etanol**

Para se realizar o processo de separação da levedura, *Scchacaromyces Cerevisiae* do vinho fermentado que sai das dornas de fermentação, são utilizadas centrífugas tubulares com as seguintes características (BICALHO, 2013):

- ✓ Capacidade: de 60 - 90 m<sup>3</sup>/h.
- ✓ Eficiência de Separação ( $\eta$ ): de 65 - 80 %
- ✓ Queda de viabilidade celular: de 10 - 20%

Com a demanda crescente de etanol e também, considerando-se o grande número de usinas de álcool, em específico na região do Triângulo Mineiro, as empresas estão, cada vez mais, investindo em novas tecnologias que proporcionem economia de energia e que garantam a qualidade do produto.

Como a centrífuga tubular é uma operação onde se tem um elevado gasto energético, sendo também de difícil operação, algumas alternativas para sua substituição estão sendo estudadas, tais como:

- ✓ A utilização de leveduras flocculentas, que diminuem o tempo de sedimentação também chamadas de levedura inteligente (microrganismos modificados geneticamente), que sabem a hora de “agir” e “trabalhar” dentro da dorna de fermentação fazendo com que o processo de sedimentação desse microrganismo na dorna de fermentação passe de 8 para aproximadamente 2 horas.
- ✓ A utilização de hidrociclones, que são equipamentos que possuem algumas vantagens em relação às centrífugas, tais como: baixo custo de fabricação, instalação e manutenção, ausência de partes móveis, elevada capacidade de operação, são prontamente esterilizáveis, permitem uma operação contínua e a longo prazo (BICALHO *et. al.*, 2013).

A utilização de hidrociclones para a separação de leveduras da fermentação alcoólica poderá propiciar economia de energia e redução nos custos de produção das usinas sucroalcooleiras instaladas no país. Também tendo a vantagem de se reduzir o custo de aquisição e manutenção de alguns equipamentos e não ter problemas de contaminação e limpeza, favorecendo o sistema automatizado de limpeza e descontaminação utilizado pelas usinas, chamado *Clean in Place* (CIP).

Além disso, destaca-se também a economia de eletricidade, pois plantas que trabalham com cogeração de energia (queima do bagaço de cana para produção de eletricidade) podem aumentar o volume de energia economizado e a produção excedente ser vendida para concessionárias de energia elétrica.

Levando em conta os aspectos mencionados anteriormente, o objetivo principal do trabalho desenvolvido foi avaliar experimentalmente o desempenho de dois mini-hidrociclones comerciais de 10 mm no processo de separação de leveduras do vinho fermentado com as centrífugas de separação utilizadas atualmente na indústria para se realizar esse processo.

Os equipamentos utilizados foram: o Doxie<sup>®</sup> tipo A (fabricado pela Dorr-Oliver) e o AKW<sup>®</sup> RWK 21 de 10 mm (fabricado pela empresa Xangai), largamente empregados em diversas operações de separação sólido-líquido. Nos ensaios experimentais, utilizou-se o vinho fermentado da Usina Uberaba (localizada na fazenda Santa Fé, km 394, Rodovia MG-190, Uberaba - MG). Foram analisadas as influências de algumas variáveis operacionais e geométricas no desempenho da separação e também na viabilidade celular. Para o hidrociclone da marca Doxie<sup>®</sup> tipo A, foram ajustadas as pressões das correntes de *underflow* e da alimentação. Para o hidrociclone da marca AKW foram ajustados o diâmetro do duto de *underflow* e a pressão na corrente de alimentação. Para avaliar a performance dos hidrociclones citados anteriormente, foram calculadas a capacidade, a eficiência total, a razão de líquido, a

eficiência total reduzida e a viabilidade celular. Para investigar o efeito dos fatores escolhidos (variáveis operacionais e geométricas) nas respostas mencionadas anteriormente foi utilizado o planejamento estatístico de experimentos. Com o objetivo de se alcançar uma maior eficiência de separação, ensaios considerando a configuração em série foram conduzidos, onde a corrente de *overflow*, após o primeiro processo de separação, foi encaminhada novamente ao hidrociclone para se realizar uma nova separação e eventuais incrementos na queda de viabilidade celular foram calculados.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção de Etanol

O etanol é obtido por três maneiras gerais: por via destilatória, por via sintética e por via fermentativa, sendo a via fermentativa a maneira mais utilizada para a obtenção de álcool no Brasil.

Um dos fatores que torna a produção de etanol por fermentação a forma mais econômica de sua obtenção, é o grande número de matérias primas naturais existentes em todo país.

Na obtenção de álcool por via fermentativa, distinguem-se três fases: o preparo do substrato, a fermentação e a destilação (LIMA., *et al* 2001).

A cana ao chegar à indústria é pesada em balança própria. A seguir é descarregada por guinchos, sendo uma parte armazenada e a outra é descarregada diretamente na mesa alimentadora onde é lavada para se inicializar o processo de produção do etanol.

A lavagem é importante, pois a cana vem da lavoura trazendo consigo bastante terra e areia, que iriam prejudicar o restante do processo. Lavada a cana, a esteira vai transportá-la até o picador, que a corta em pedaços e a seguir ao desfibrador, que irá abrir suas células para facilitar a próxima etapa, que é a extração do caldo. Essa extração é feita nas moendas, no total, a cana passa por quatro ternos de moenda para que todo o caldo seja aproveitado. Para que isso ocorra é feita, também, uma embebição d'água após a passagem do 1º terno. Dessa moagem vai resultar o caldo de cana e o bagaço. Parte do bagaço será queimado na caldeira, que é a unidade produtora de vapor que irá gerar toda energia necessária ao complexo industrial, e uma porcentagem é hidrolizada servindo para ração animal. O outro produto, o caldo, passa por uma peneira onde separa o caldo e o bagacilho. Quase todos os açúcares existentes na cana estarão neste caldo, que é caldo misto e é bombeado para os aquecedores entre 90° e 105°C, seguindo para o decantador, onde ocorre a decantação das impurezas nele contidas, o que resulta o caldo clarificado e o lodo para a recuperação do caldo nele existente, através de filtros rotativos a vácuo, retirando-se o caldo limpo e a torta, a qual é enviada para lavoura como adubo, pois é rica em sais minerais.

O caldo clarificado é bombeado para um tanque "pulmão", passando a seguir por um trocador de calor, onde é resfriado para então seguir para o processo de fermentação. A fermentação é o processo que transforma os açúcares em álcool, pela ação das leveduras. As

leveduras estão contidas no fermento (mosto), que é misturado no caldo, para que todos os açúcares sejam transformados em álcool.

A mistura fica nas dornas (recipientes de fermentação) por volta de 06 a 08 horas. Uma vez fermentado o caldo, obtém-se o vinho. O vinho é centrifugado, separando-se em duas partes: na primeira parte, obtém-se o leite de levedura, que foi o responsável pela transformação. Essa parte será usada em novas fermentações, logo após sofrer um tratamento químico adequado. Além do processo de transformação, uma porcentagem é desidratada servindo para ração animal. A segunda parte, o vinho de levedura, que contém de 7 a 8% de álcool é enviado para as colunas de destilação para sua purificação e depois o etanol obtido por esse processo é armazenado (UDOP – União dos Produtores de Bioenergia).

## **2.2 Hidrociclones como uma nova alternativa para o processo de separação das leveduras após o processo fermentativo.**

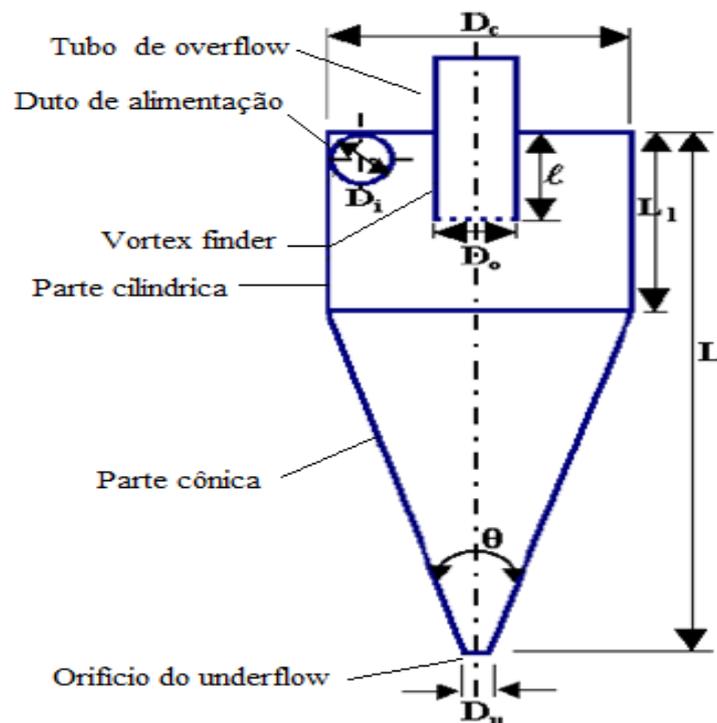
A separação de microrganismos de fermentação alcóolica vem ganhando destaque no meio científico. As empresas e os órgãos ambientais exigem cada vez mais das produtoras de álcool ações que visem à recuperação e do reaproveitamento de subprodutos industriais. Atualmente, são utilizadas centrífugas tubulares operando em série e a elevadas rotações, para atingir uma eficiência total de separação considerada satisfatória, em torno de 85%. Outras técnicas de separação vêm sendo estudadas, tais como: a sedimentação flocculenta, a flotação e a utilização de mini hidrocilones.(ALVES, 2006).

Os hidrociclones, segundo Svarovsky (2000) , são equipamentos baratos e requerem baixo custo de manutenção, são pequenos comparados com outros separadores economizando espaço, tendo assim, pequenos tempos de residência.

Hidrociclones utilizam o mesmo princípio das centrífugas (sedimentação em um campo centrífugo), porém sem partes móveis e sem complexidade mecânica. Por essas razões, bem como sua versatilidade em aplicações, baixo custo de fabricação, instalação e manutenção, operação simples, tamanho reduzido, produção de eficiências elevadas com pequenos tempos de residência, podendo ser utilizados inclusive em baterias (separadores em paralelo) para aumentar a capacidade, estes equipamentos têm sido amplamente encontrados no setor industrial (SVAROVSKY, 2000).

O hidrociclone é um equipamento constituído por uma parte cilíndrica, sendo essa parte ligada a uma seção cônica. A suspensão de partículas em um líquido é injetada

tangencialmente pela abertura de entrada na parte cilíndrica, tendo como resultado um movimento rotacional em seu interior. Esse equipamento possui um tubo axial para a saída de uma corrente superior chamada de *overflow* a qual sai a suspensão contendo as partículas menos densas, e na extremidade inferior do cone existe uma saída, onde sai uma suspensão contendo uma corrente de suspensão de partículas mais densas chamada de *underflow*. (SVAROVSKY, 1984). As partes de um hidrocilone estão representadas pela Figura 2.1.



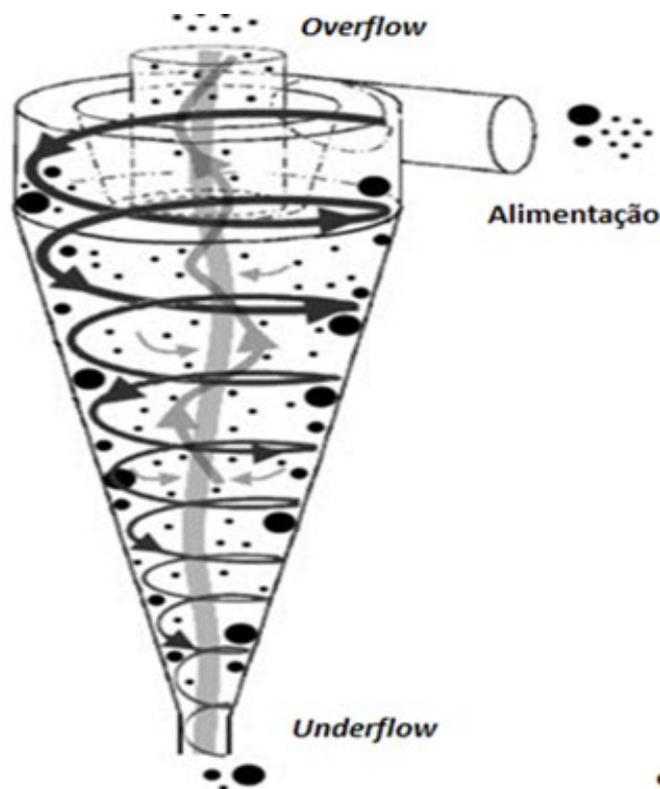
**Figura 2.1 - Representação da geometria de um hidrocilone**

O hidrocilone ao ser alimentado tangencialmente na parte cilíndrica e a altas pressões, desenvolve-se dentro dele uma força centrífuga imprimindo assim na suspensão um movimento rotacional, que desloca as partículas maiores e/ou mais densas para a sua parede, sendo que as mesmas são encaminhadas para a saída da parte cônica chamada de *underflow*. As partículas menos densas que não saíram na abertura da parte cônica permanecem no eixo central e que, devido a um movimento rotacional ascendente, são encaminhadas e descarregadas pelo orifício superior localizado na parte cilíndrica chamado de *overflow* (*vortex finder*).

O escoamento da suspensão dentro dos hidrociclones é bastante complexo e pode ser dividido em três componentes: axial, tangencial e radial. A componente tangencial desse escoamento é responsável pelo estabelecimento das forças centrífugas e de cisalhamento dentro

do equipamento, sendo que essas forças mantem a parede do hidrociclone sem acúmulo de sólidos. As forças centrífugas que são dependentes da posição axial e radial no hidrociclone, são as componentes responsáveis pela coleta de uma determinada partícula no *underflow*. A transferência de momento de uma componente para a outra é constantemente executada, principalmente quando o fluido se aproxima da corrente de *underflow*, devido ao movimento rotacional apresentado pelo fluido, que vai cedendo energia simultaneamente para as componentes, axial e radial, presentes no equipamento. (SCHAPEL; CHASE 1998)

Uma representação dos movimentos rotacionais desenvolvidos dentro do hidrociclone está apresentada pela Figura 2.2.



**Figura 2.2 - Movimentos Rotacionais Desenvolvidos por Hidrociclones**

**Fonte:** (BICALHO, 2013).

As principais forças atuantes nas partículas dentro do hidrociclone são: a força centrífuga criada pelo movimento rotacional das partículas, sendo essa força várias vezes maiores que a força da gravidade, a força de empuxo devido à diferença da densidade entre o fluido e a partícula, e também a força de arraste.

Os diâmetros da parte cilíndrica dos hidrociclones variam de 10 mm a 2,5 cm, com o diâmetro de corte para sólidos que variam de 2 a 250  $\mu\text{m}$ . As vazões volumétricas variam de 0,1 a 7200  $\text{m}^3/\text{h}$ , com pressões de 0,34 a 6 bar. E a sua performance depende das condições de operação e da natureza dos sólidos a serem separados. (SVAROVSKY, 2000)

Os hidrociclones são extremamente versáteis nas seguintes aplicações de Separação sólido-líquido:

- ✓ Clarificação seletiva,
- ✓ espessamento;
- ✓ fracionamento;
- ✓ pré-concentração;
- ✓ recuperação de líquidos;

sendo que esse equipamento é encontrado em diversos setores industriais tais como: minerações, tratamento de água e principalmente onde há separação de partículas por diferença de densidades (ALMEIDA, 2008).

Os hidrociclones, segundo Svarovsky (2000), são equipamentos baratos e requerem baixo custo de manutenção, são pequenos comparados com outros separadores economizando espaço, tendo assim, pequenos tempos de residência.

### 2.2.2 Famílias de Hidrociclones

Segundo Svarovsky (1984) os hidrociclones são agrupados em famílias, de acordo com a Tabela 2.1, possuindo como característica principal a relação entre suas medidas geométricas associadas ao diâmetro da parte cilíndrica.

**Tabela 2.1 - Relações geométricas de algumas famílias de hidrociclones.**

Relações Geométricas	Família de Hidrociclones					
	AKW $D_c=0,125\text{m}$	Bradley $D_c=0,038\text{m}$	Rietema $D_c=0,075\text{m}$	Demco $D_c=0,051\text{m}$	Mozley 0,044m	Warman $D_c=0,076\text{m}$
$D_i/D_c$	0,2	0,133	0,28	0,217	0,16	0,29
$D_0/D_c$	0,32	0,8	0,34	0,5	0,25	0,20
$l/D_c$	0,8	0,33	0,4	1	0,57	0,31
$L/D_c$	6,24	6,85	5	4,7	7,71	4
$\Theta$ ( $^\circ$ )	15	9	20	25	6	15

As relações geométricas ( $D_c$ ,  $D_i$ ,  $D_0$ ,  $l$ ,  $L$  e  $\Theta$ ) apresentadas na tabela representam as dimensões da Figura 2.1 apresentadas na seção 2.2.1.

Essa proporcionalidade existente entre as relações geométricas (diâmetro da parte cilíndrica e as demais) é importante no processo de separação, pois está diretamente relacionado com a capacidade de separação desses equipamentos.

### 2.2.3 Análise Granulométrica

Para se avaliar o potencial de separação de um hidrociclone é importante que se faça a análise granulométrica das partículas presentes na suspensão, e uma das maneiras de se realizar esse procedimento é através da aplicação de modelos estatísticos de distribuição que relacionam a quantidade de material, em termos de fração mássica ou volumétrica ( $X_{(d)}$ ), com o tamanho da partícula ( $d_p$ ). Os modelos a 2 parâmetros descrevem satisfatoriamente a maioria dos casos de interesse tecnológico. Os modelos de distribuição granulométrica estão listados pelas Equações (2.1), (2.2), (2.3) e (2.4) a seguir:

- ✓ Modelo *Gates – Gaudim – Shaumann* (GGS);

$$X_{(d)} = \left( \frac{d_p}{D_{50}} \right)^m \quad (2.1)$$

- ✓ Modelo *Rosin – Rammler – Bennet* (RRB);

$$X_{(d)} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{D_{63,2}} \right)^m \right] \quad (2.2)$$

- ✓ Modelo Log - Normal;

$$X_{(d)} = \frac{1 + \operatorname{erf}(Z)}{2} \quad (2.3)$$

$$Z = \ln \left( \frac{\frac{d_p}{D_{50}}}{\sqrt{2 \ln \delta}} \right) \quad (2.4)$$

- ✓ Modelo Sigmóide;

$$X_{(d)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{D}{d} \right)^m} \quad (2.5)$$

Os modelos de distribuição granulométrica apresentados, possuem parâmetros ( $D$  e  $m$  por exemplo) que são encontrados através de regressão não linear através dos dados experimentais da distribuição granulométrica do material particulado.

#### 2.2.4 Números Adimensionais Relevantes

As aplicações das equações do movimento e da continuidade no escoamento dentro dos hidrociclones, levam a utilização de equações bastante complexas para a utilização prática, devido a esse motivo, para se fazer a abordagem matemática nesses equipamentos são utilizados números adimensionais.

No estudo de hidrociclones, os números adimensionais aplicados no processo de separação são: o de Stokes ( $Stk_{50}$ ) relacionado ao poder de separação, o de Euler ( $Eu$ ) relacionado aos custos energéticos e o de Reynolds ( $Re$ ) que relaciona o regime de escoamento. Esses números adimensionais estão descritos pelas Equações (2.6), (2.7), (2.8) a seguir:

$$Re = \frac{D_c u_c \rho}{\mu} \quad (2.6)$$

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{\rho(u_c)^2}{2}} \quad (2.7)$$

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho) u_c (d_{50})}{18 \mu D_c} \quad (2.8)$$

Os números adimensionais acima levam em consideração a velocidade superficial no corpo cilíndrico, que é representada pela seguinte expressão:

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (2.9)$$

Na prática, além dos números de Stokes ( $Stk_{50}$ ), Euler ( $Eu$ ) e Reynolds ( $Re$ ), a razão de líquido ( $R_L$ ) e a concentração volumétrica da alimentação ( $c_{v_a}$ ), também influenciam no desempenho dos hidrociclones. Dessa forma devem-se relacionar esses grupos adimensionais da seguinte forma:

Segundo Svarovsky (1984) O produto de Stokes e Euler é dado pela seguinte equação:

$$Stk_{50} = \frac{\pi(\rho_s - \rho)(-\Delta P)D_c (d_{50})^2}{36\pi\rho Q} \quad (2.10)$$

A concentração volumétrica da alimentação ( $c_v$ ) e a razão de líquido ( $R_L$ ) são adimensionais que também influenciam o desempenho de hidrociclones. Desta forma, é conveniente relacionar os cinco grupos adimensionais da seguinte forma (CASTILHO; MEDRONHO, 2000).

$$Stk_{50} Eu = K_1 \left[ \ln \left( \frac{1}{R_L} \right) \right]^{n_1} \quad (2.11)$$

$$Eu = K_2 Re^{n_2} e^{(n_3 c_v)} \quad (2.12)$$

$$R_L = K_3 \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{n_4} Eu^{n_5} \quad (2.13)$$

Para essas equações empíricas os valores dos parâmetros  $K_1, K_2, K_3, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ , são estimados para cada família de hidrociclones.

### 2.2.5 Eficiência de Separação Sólido Líquido

A eficiência de separação de um hidrociclone depende da sua geometria, das propriedades físicas do sólido e do fluido e das condições operacionais (SILVA; MEDRONHO 1988). As variáveis, em termos de eficiência, estudadas em hidrociclones são: eficiência total ( $\eta$ ), eficiência total reduzida ( $\eta'$ ) e a eficiência granulométrica( $G(d)$ ).

### 2.2.6 Razão de Líquido ( $R_L$ )

Ao se alimentar vagarosamente (a baixas pressões) uma suspensão em um hidrociclone, ou seja, não imprimindo um movimento rotacional dentro do equipamento, parte da massa sólida é separada desconsiderando a ação centrífuga, pois o equipamento age como um divisor de fluxo, onde parte dos sólidos são retirados no concentrado. A esse fenômeno dá-se o nome conhecido como efeito T, pois o equipamento funciona nesse caso como se fosse

uma conexão T.

A razão de líquido é dada pela relação entre as vazões mássicas ou volumétricas do líquido que sai pelo *underflow*, e na alimentação do equipamento, conforme a Equação (2.15) abaixo:

$$R_L = \frac{W_u (1 - c_{wu})}{W_a (1 - c_{wa})} = \frac{Q_u (1 - c_{vu})}{Q_a (1 - c_{va})}$$

### 2.2.7 Eficiência Total ( $\eta$ )

A eficiência total, leva em consideração todo o sólido coletado no *underflow*. Essa eficiência é calculada através da relação entre a vazão mássica ou volumétrica de sólidos recuperados no *underflow* e a vazão mássica ou volumétrica de sólidos alimentados no equipamento, de acordo com a relação apresentada abaixo (SVAROVSKY 2000):

$$\eta = \frac{c_{wu} W_u}{c_{wa} W_a} = \frac{Q_u c_{vu}}{Q_a c_{va}} \quad (2.14)$$

(2.15)

### 2.2.8 Eficiência Total Reduzida ( $\eta'$ )

Para se calcular o potencial de separação do hidrociclone, é calculada a eficiência total reduzida, que leva em conta apenas a separação das partículas pelo efeito do campo centrífugo, desconsiderando assim o efeito T (divisão de fluxo). A expressão para o cálculo da eficiência total esta representada abaixo:

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L} \quad (2.16)$$

### 2.2.9 Eficiência Granulométrica

Segundo Vieira (2006) a eficiência granulométrica  $G_{(d)}$ , conhecida como eficiência de coleta ou de tamanho, está relacionada à performance de separação do hidrociclone, no que diz respeito às partículas sólidas que entram no duto de alimentação. Considerando os diferentes

tamanhos de partículas existentes na suspensão a ser tratada, a eficiência granulométrica pode ser relacionada pela eficiência total de separação ( $\eta$ ) e com a variação das partículas após a hidrociclonagem:

$$G(d) = \frac{W_u dX_u(d)}{W_a dX_a(d)} = \eta \frac{dX_u(d)}{dX_a(d)} \quad (2.17)$$

Segundo Vieira (2006), para se estudar o desempenho de um hidrociclone, as análises granulométricas das correntes de alimentação e *underflow*, devem ser efetuadas para que se obtenha o diâmetro de corte. Esse parâmetro é fundamental para o estudo do processo de separação por expressar o poder classificatório do equipamento, sendo utilizado como critério de comparação na avaliação de desempenho de hidrociclones. O diâmetro de corte é obtido a partir da resolução da Equação a seguir:

$$G(50) = \frac{W_u dX_u(d)}{W_a dX_a(d)} = 0,5 \quad (2.18)$$

A maioria das partículas menores que esse diâmetro sairá no diluído (*overflow*), enquanto que as partículas maiores que esse diâmetro sairão na corrente do concentrado (*underflow*) (ALVES, 2006).

### 2.2.10 Eficiência Granulométrica Reduzida

Assim como nos cálculos para se achar a eficiência total reduzida ( $\eta'$ ), a eficiência granulométrica reduzida também desconsidera o efeito T (efeito da divisão dos fluxos), considerando-se apenas o efeito do campo centrífugo. Dessa maneira, o cálculo dessa eficiência segue a seguinte equação:

$$G'(d) = \frac{G - R_L}{1 - R_L} \quad (2.19)$$

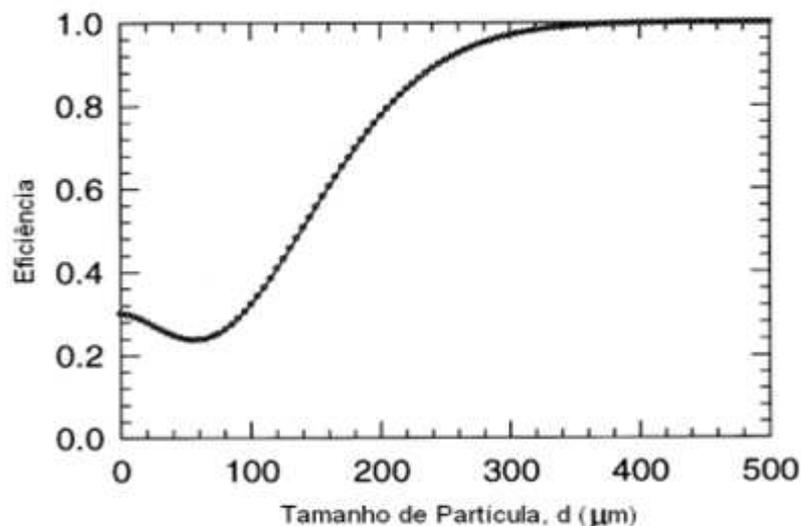
De forma análoga a Equação (2.18) é possível calcular o diâmetro de corte reduzido ( $d'_{50}$ ) do equipamento, com o intuito de se avaliar o diâmetro da partícula que será classificada

com uma eficiência granulométrica reduzida de 50%. Esse parâmetro mede o potencial de separação do hidrociclone desconsiderando a razão de líquido (negligenciando o efeito T).

### 2.2.10 Efeito *Fish Hook* em Hidrociclones

O efeito de *Fish Hook* é denominado por alguns autores como sendo um fenômeno inesperado, caracterizado pela inversão da curva ou grade de eficiência granulométrica. Normalmente essa curva decresce monotonicamente com a diminuição do tamanho da partícula e é assintótica para um dado valor de razão de líquido. Desta forma a eficiência granulométrica das partículas muito finas não é zero e sim igual a razão de líquido. É um fenômeno que ocorre esporadicamente e ao acaso, mesmo quando não se altera as condições operacionais. Quando ocorre este efeito, a precisão da eficiência do trabalho é desconsiderada. (BORGES; *et. al.*, 2005).

Este efeito também recebe o nome de efeito anzol. Ele ocorre com mais frequência na região das partículas finas. Com o avanço da tecnologia é possível determinar a distribuição de tamanhos de partículas ultrafinas ( $< 10\mu\text{m}$ ). A partir desses dados é possível observar este efeito, após a desaglomeração completa das partículas, na curva de partição, como pode ser observado na Figura 2.3 (MELO, 2010).



**Figura 2.3 - Curva de Partição Onde se Observa do Efeito “Fish Hook” nas partículas menores. Fonte: (MELO, 2010).**

Esse fenômeno vem ganhando destaque desde que iniciaram-se as análises de partículas baseadas na difração de luz *laser*, equipamento este que apresenta uma grande

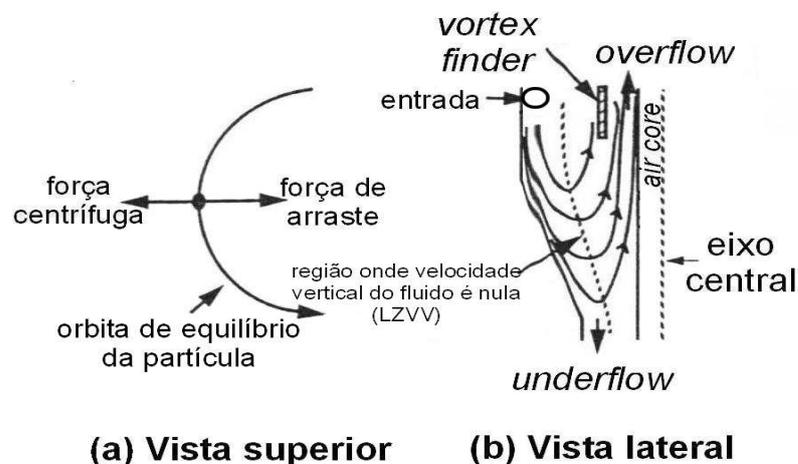
precisão. Para que se identifique este fenômeno se faz necessário obter a curva de eficiência granulométrica em função do diâmetro do material particulado (ALVES, 2006).

### 2.2.11 Teorias Clássicas de Separação Sólido Líquido em Hidrociclones

Conhecida a distribuição granulométrica da partícula elaboram-se teorias de separação, com o objetivo de prever a eficiência de coleta e as quedas de pressões dentro do equipamento. Algumas dessas teorias estão representadas a seguir.

#### Teoria da Órbita de Equilíbrio

Essa teoria baseia-se no conceito do raio de equilíbrio da partícula, e foi originalmente proposta por Criner (1950) e Driessen (1951). De acordo com esta teoria, partículas de um dado tamanho atingem uma órbita de equilíbrio radial no hidrociclone, na qual suas velocidades terminais de sedimentação no campo centrífugo  $v_t$ , são exatamente iguais à velocidade radial do líquido no sentido do eixo do equipamento  $u_r$ . De forma simplificada, as partículas no interior do ciclone estão sujeitas a duas forças opostas: **(i)** a força centrífuga atuando no sentido da parede do equipamento, **(ii)** a força de arraste do líquido atuando na mesma direção da força centrífuga, porém no sentido do eixo central do equipamento. A Figura 2.4 ilustra as forças que atuam na partícula, e também a região no interior do hidrociclone onde a velocidade vertical do fluido é nula



**(a) Vista superior**      **(b) Vista lateral**

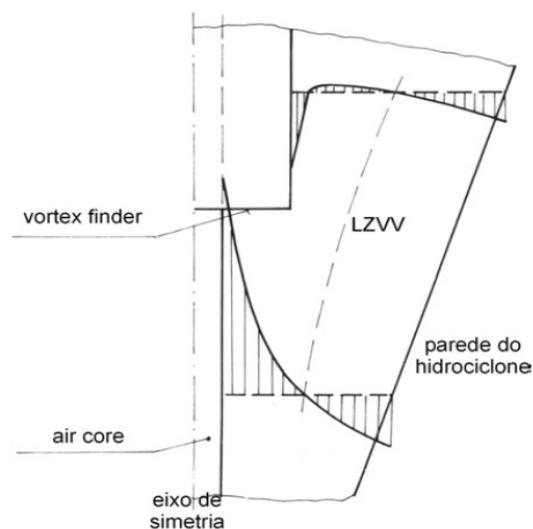
**Figura 2.4 - Forças que atuam sobre a partícula**

Fonte: (SVAROVSKY, 1984).

As partículas próximas ao *vortex finder* (próximas ao eixo do equipamento) serão coletadas no *overflow* e partículas próximas à parede do separador serão coletadas no *underflow*. Essa forma de interpretar o mecanismo de separação sugere que as velocidades ( $v_t$  e  $u_r$ ) têm sentidos opostos, portanto, em algum local no interior do ciclone deve existir uma superfície onde a velocidade da partícula é zero.

O modelo da órbita de equilíbrio leva a bons resultados quando as suspensões a serem separadas forem bastante diluídas, pois o aumento da concentração de sólidos faz com que se desconsidere o tempo de residência e os efeitos da turbulência existentes no escoamento da suspensão.

Nos hidrociclones, existem regiões onde a velocidade vertical das partículas é nula (LZVV). Esses locais estão representados na Figura 2.5 a seguir:



**Figura 2.5 - Perfil de velocidade vertical dentro do hidrociclone**

**Fonte:** (SVAROVSKY, 1984)

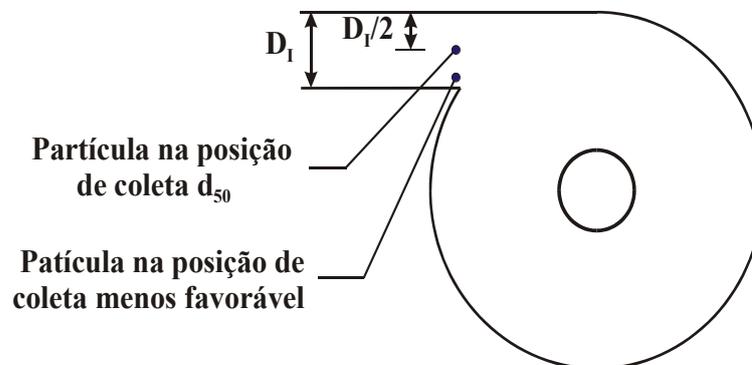
Nos pontos onde o raio da órbita coincide com o raio de equilíbrio (LZVV), as partículas podem se encaminhar tanto para o *underflow*, quanto para o *overflow* sendo a medida dessas partículas o diâmetro de corte do equipamento  $d_{50}$  (SVAROVSKY, 1984).

### **Teoria do Tempo de Residência**

A teoria do tempo de residência prevê que uma partícula chegará até a parede e será separada quando seu tempo de residência for maior ou igual ao tempo necessário para que esta

partícula se movimenta radialmente do ponto de entrada do equipamento até a parede. Essa teoria foi proposta por Rietema (1961), onde foi assumida a distribuição homogênea de todas as partículas através do orifício da alimentação, a validade do regime de Stokes para a velocidade terminal e a negligência dos efeitos de turbulência e concentração no processo de separação.

Para a teoria do tempo de residência, é considerado que as partículas com diâmetro de corte ( $d_{50}$ ), são aquelas que quando alimentadas no equipamento se encaminham para o centro do duto de alimentação e que demoram um tempo de residência ( $t_r$ ) para alcançar, assim, a parede do tubo, como é mostrado na Figura 2-6 abaixo:



**Figura 2.6 - Vista superior de um hidrociclone**

**Fonte:** (Alves, 2006).

Em termos matemáticos, isso significa que a velocidade de queda radial da partícula integrada ao longo do tempo deve ser igual à metade do diâmetro do duto de alimentação, e essa relação matemática está representada pela relação abaixo:

$$\int_0^{t_r} v_r dt = \frac{1}{2} D_i \quad (2.20)$$

Se for considerada a partícula que entra no hidrociclone na posição mais desfavorável à separação da mesma terá que percorrer, na pior das hipóteses, uma distância radial igual ao diâmetro do tubo de alimentação para ser separada.

Em que  $v_r$  é calculada através da velocidade tangencial do fluido ( $u_\theta$ ) que é igual a velocidade tangencial da partícula ( $v_\theta$ ) dada pela Equação (2.21):

$$v_r = \frac{d_{50}^2 \Delta\rho}{18\mu} \cdot \frac{u_\theta}{r} \quad (2.21)$$

O tempo de residência é a relação entre as proporções do hidrociclone e as definições de velocidade axial do fluido.

$$u_z = \frac{dz}{dt} \quad (2.22)$$

Considerando-se que um escoamento perto da parede segue o contorno da parede, a seguinte relação é proposta:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{L_c}{R} \quad (2.23)$$

Com as equações anteriores, Rietema (1961) criou uma equação para representar a queda de pressão que ocorre dentro do equipamento:

$$\frac{dz}{dr} = \rho \int_0^R \frac{u_\theta^2}{r} dr \quad (2.24)$$

Obtendo, assim, o seguinte número adimensional:

$$\frac{d_{50}^2 \Delta\rho L_c}{\mu\rho Q_a} = \frac{36u_z R}{\pi u_i D_I} \quad (2.25)$$

### **Teoria populacional**

Essa teoria foi primeiramente sugerida por Fahlstrom (1960), que propôs que o diâmetro de corte é, em princípio, uma função do diâmetro do orifício do *underflow* e da distribuição de tamanhos das partículas na alimentação. Ele argumentou que o efeito populacional, ou de concentração no *apex*, pode afetar a correlação de forças a tal ponto que o diâmetro de corte poderia ser estimado pela massa recuperada no *underflow*. O efeito populacional esta sujeito à proximidade física das partículas sólidas e isso depende do volume,

ao invés da massa.

Sabe-se que a escolha do orifício do *underflow* influencia fortemente o diâmetro de corte. A questão que se coloca é como descrever o efeito quantitativamente; recentemente, esse efeito tem sido simplesmente relatado através da concentração volumétrica no *underflow*, em conjunto com o tamanho absoluto do orifício e a distribuição de tamanhos das partículas na alimentação.

### Teoria do Escoamento Bifásico Turbilhonar

Os modelos comentados anteriormente não incluem, em suas hipóteses básicas, o efeito da turbulência no processo de separação. Este efeito modifica o perfil de velocidades, e altera as características do equipamento como separador. O efeito da turbulência na separação em hidrociclones é objeto de interesse desde o trabalho de Driessen (1951). A questão é saber como a turbulência modifica o perfil de velocidade tangencial, isto é, seu efeito no expoente  $n$  na equação para a velocidade tangencial, a seguir:

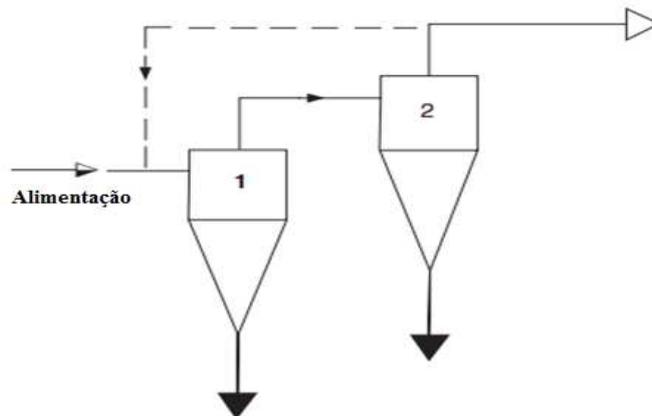
$$u_{\theta} = \frac{N}{r^c} \quad (2.26)$$

na qual  $N$  é uma constante empírica e  $c$  é uma função de Reynolds.

### 2.3 Configuração de Hidrociclones em Série

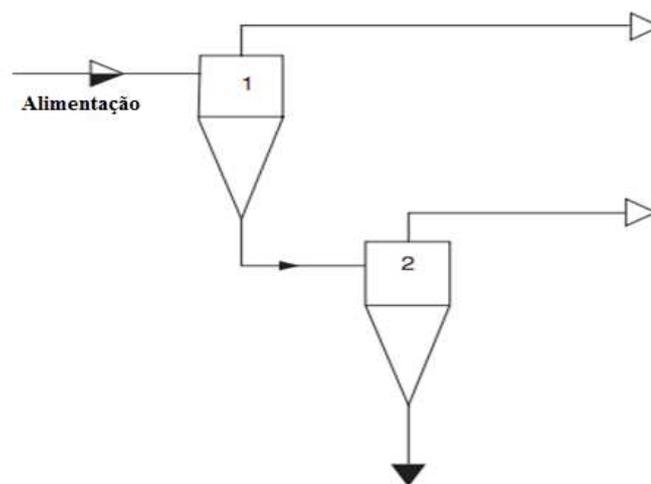
Segundo Hwang *et al* (2008), os hidrociclones podem ser instalados em série, para aumentar a eficiência de separação do processo, ou em paralelo, para se aumentar a capacidade de separação. A Figura 2.7 apresenta uma configuração de hidrociclones em série utilizada para se realizar processos de clarificação.

A configuração de hidrociclones em série, é utilizada quando se deseja aumentar a performance de separação dos processos que operam apenas com uma unidade desse equipamento. E devido ao seu baixo custo, e facilidade de operação muitos arranjos em série, veem sendo utilizados. Para a aplicação de hidrociclones em série no processo de clarificação é usada a configuração da Figura 2.7, onde a corrente de *overflow* do primeiro, equipamento é a alimentação do segundo (SVAROVSKY, 2000).



**Figura 2.7 - Dois hidrociclones em série usados em processos de clarificação**  
 Fonte: (SVAROVSKY, 2000)

Nos processos de espessamento, quando se deseja um alto grau de concentração da corrente de *underflow*, que não é alcançado com a utilização de apenas de um equipamento, dois ou mais hidrociclones podem ser conectados em série, onde a corrente de *underflow* do primeiro aparelho é a alimentação do segundo, e assim sucessivamente, de acordo com a Figura 2.8.

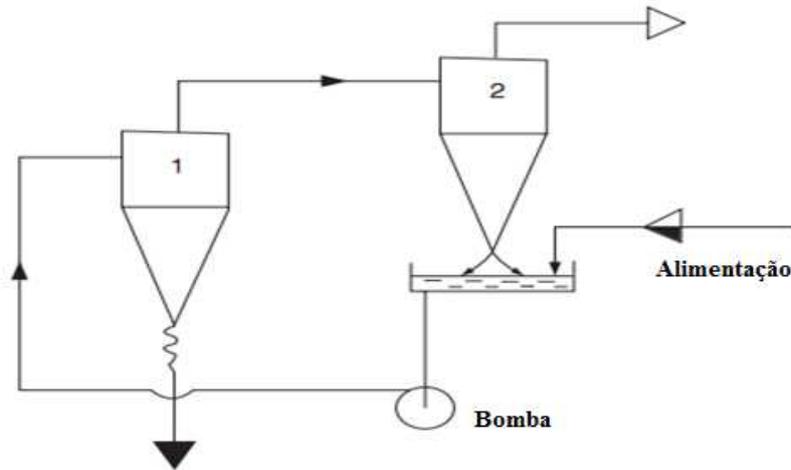


**Figura 2.8 - Configuração de hidrociclones em série para o processo de espessamento**  
 Fonte: (SVAROVSKY, 2000).

A corrente de *overflow* que sai a partir do segundo estágio pode ser parcialmente reciclada, retornando assim para o primeiro estágio da configuração.

Se ambos os processos forem necessários simultaneamente (clarificação e espessamento) dois ou três arranjos são requeridos, onde alguns hidrociclones são usados para

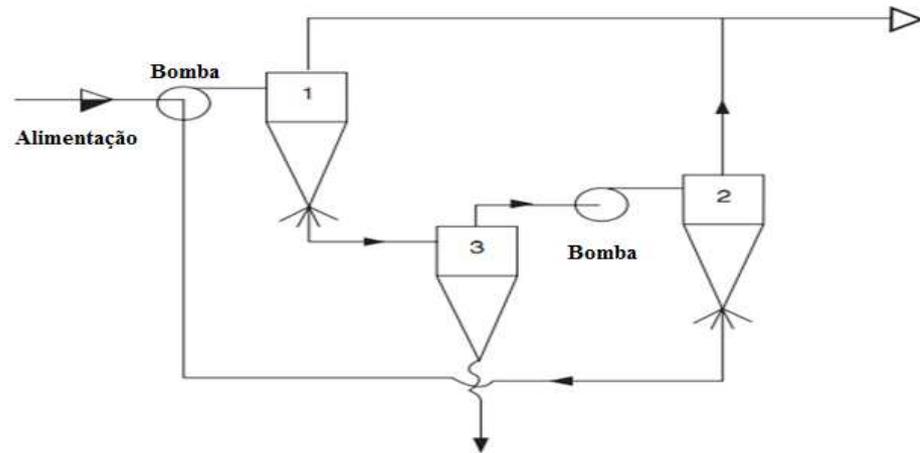
o processo de clarificação e outros são utilizados para o processo de espessamento, de acordo com a Figura 2.9 no qual a corrente de *overflow* do primeiro hidrociclone é a alimentação do segundo, e após o processo de separação a corrente de *underflow* do segundo equipamento retorna, se juntando a corrente de alimentação do primeiro equipamento.



**Figura 2.9 - Dois hidrociclones em série onde o underflow do segundo estágio é reciclado, para o processo de espessamento e clarificação ao mesmo tempo**  
**Fonte: (SVAROVSKY, 2000).**

No esquema mostrado pela Figura anterior, o hidrociclone “espessante” é representado pelo primeiro estágio, seguido por um ou mais estágios (hidrociclones) de clarificação, onde a corrente de *underflow* dos estágios que sucedem o primeiro (estágios de clarificação) são recicladas e alimentadas no primeiro equipamento (espessante). A recuperação global do conjunto é melhor do que qualquer um dos hidrociclones quando utilizados individualmente. A corrente de reciclo, nesse caso, pode ser mais diluída do que a alimentação, a fim de que a alimentação do estágio de espessamento fique diluída. Se a alimentação for muito diluída (menos do que 1%) e o hidrociclone de espessamento não produzir uma corrente bastante concentrada no *underflow*, outro arranjo pode ser usado, como o representado na Figura 2.10.

Nessa configuração, o primeiro estágio é de clarificação ao qual a corrente de *underflow* é a alimentação de um hidrociclone responsável pelo processo de espessamento. Após o processo de espessamento, a corrente de *underflow* é retirada, e a corrente de *overflow* é encaminhada para outro estágio de clarificação, sendo que o concentrado do primeiro equipamento de número 2, conforme a Figura 2.10, retorna para o de número 1 juntamente com a alimentação. Essa configuração é relativamente pequena e alcança uma boa performance para o processo de espessamento ( SVAROVSKY, 2000).



**Figura 2.10 - Arranjo com três hidrociclones para clarificação e espessamento, para alimentações diluídas**

**Fonte:** (SVAROVSKY, 2000)

Para se avaliar a performance de separação de plantas que utilizam a configuração de hidrociclones em série, é calculada a eficiência total de separação de acordo com a seguinte Equação:

$$\eta = 1 - [(1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_{n-1})(1 - \eta_n)] \quad (2.28)$$

#### 2.4 O agente de fermentação alcoólica

As leveduras são os microrganismos mais importantes na fermentação do álcool por via fermentativa, sendo que a levedura *Shaccharomyces* é um dos grupos mais estudados pela comunidade científica. (ANDRIETA, 2000)

A fermentação alcoólica é, portanto, um processo biológico conduzido pela levedura *Scchacaromyces cerevisiae*, na forma unicelular com 2 a 8  $\mu\text{m}$  (micrômetros) cuja fisiologia e bioquímica tem sido negligenciada em favor de uma visão físico química e mecânica do processo. Porém, trata-se de um organismo vivo com múltiplas atividades metabólicas, sendo sensível às alterações do meio, com grande impacto no rendimento do processo. (LIMA, BASSO., et al 2001)

As leveduras *Scchacaromyces cerevisiae* são microrganismos de alta eficiência fermentativa. Esse fato tem permitido a seleção de cepas industriais com características adquiridas, que as tornam, cada vez, mais produtivas (maior rendimento na produção de etanol)

e que também possibilitam melhoras no processo de produção. Dentre os estudos relacionados à melhoria das características da levedura se destaca: a sedimentação floculenta.

#### **2.4.1 Sedimentação Floculenta e Leveduras Inteligentes**

O uso de leveduras floculantes vêm sendo pesquisada para substituir uma das etapas mais complexas do processo de produção de etanol, que é a centrifugação do vinho fermentado (mosto fermentado) para a separação da levedura (material sólido) da solução alcoólica que segue para purificação nas etapas de destilação.

Floculação nas leveduras é usualmente definida como a habilidade das células em se agregar espontaneamente e formar flóculos aos quais se sedimentam rapidamente. Esta capacidade de sedimentação das leveduras tem sido tradicionalmente utilizada por indústrias de vinho e no processo de produção de etanol por fermentação (TEIXEIRA *et. al*, 1995).

Os sistemas que utilizam desse tipo de leveduras, permitem um aumento da produtividade do processo biotecnológico, apresentando as seguintes vantagens (DOMINGUES, 2001):

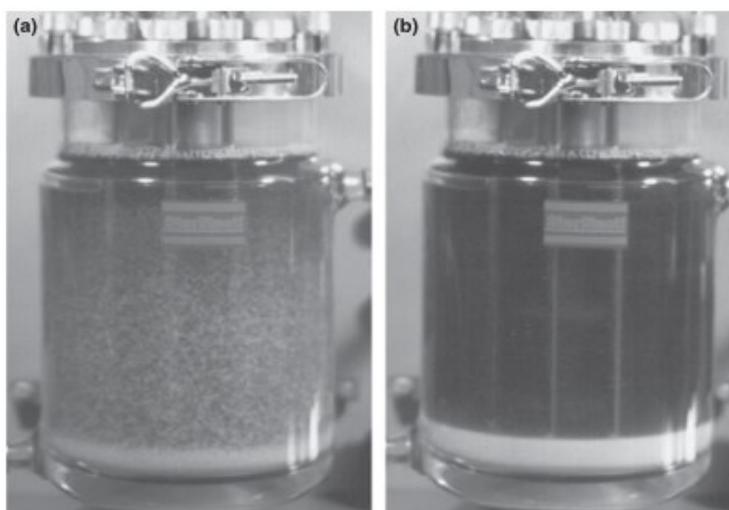
- ✓ Elevada densidade celular por unidade de reator, resultando em elevadas velocidades de fermentação.
- ✓ Possibilidade de se operar acima da taxa de diluição de lavagem.
- ✓ Volume de reator menor, reduzindo os custos de capital.
- ✓ Reutilização das células por períodos de tempo prolongados, devido à constante regeneração.
- ✓ Diminuição da contaminação.
- ✓ Fácil separação das células da fase líquida.

A habilidade dessas leveduras em se agregar facilita muito o processo de separação, o qual não requer nenhum tipo de energia (energia extra para separação como no caso da centrifugação). E também, devido a possibilidade de se trabalhar com altas concentrações de microrganismos dentro do reator (fermentador). O rendimento global do processo é aumentado (SOARES, 2010).

As leveduras chamadas de “inteligente” são um tipo de microrganismo que apresenta a capacidade de flocular e se alojar no fundo da dorna quando a glicose é totalmente consumida, ou seja, quando cessa o processo fermentativo. Esse processo ocorre devido à mudança de posição de um dos genes presentes no genoma da levedura que, na presença de moléculas de glicose (novo substrato) ativa seu processo metabólico, enquanto na falta do mesmo mantém o

microrganismo em estado de latência se sedimentando no fundo do recipiente (ALVES, 2006; BICALHO, 2011).

O processo de sedimentação com a utilização de leveduras flocculentas é representado pela Figura 2.11, onde se verifica que no recipiente (a) as leveduras não flocculentas se encontram em suspensão na solução, enquanto que no recipiente (b) as contendo as leveduras flocculentas se encontram sedimentadas formando um espesso corpo de fundo.



**Figura 2.11 - Fermentação utilizando leveduras flocculentas**  
**Fonte:** (Soares, 2010)

## 2.5 Centrífugas Industriais

As centrífugas industriais são classificadas em três grupos: as centrífugas filtrantes, as centrífugas de sedimentação e as centrífugas de disco.

### 2.5.1 Centrífugas Filtrantes

As centrífugas filtrantes são equipamentos nos quais a suspensão sólido – líquido é encaminhada para a parede devido à ação da força centrífuga, em que o sólido é retido através de um meio filtrante e o líquido passa através da torta de sólidos e do filtro. Nesse tipo de separação não precisa haver diferenças de densidade entre as fases.

### 2.5.2 Centrífugas de Sedimentação

A centrífuga de sedimentação é baseada na diferença de densidade entre duas fases das misturas alimentadas (misturas sólido – líquido ou líquido – líquido), as partículas dentro do equipamento estão sujeitas a forças centrífugas, fazendo com que a mistura se mova em um movimento rotacional onde a fase mais densa é encaminhada a parede do equipamento sendo removida na forma de concentrado. O clarificado é então descarregado do lado oposto ao lado onde é feita a alimentação. O processo de separação em centrífugas de separação pode ser feito continuamente ou em batelada, e as aplicações típicas do processo variam da clarificação ao espessamento. Algumas características das centrífugas de sedimentação são mostradas na Tabela 2.2 a seguir (SAVAROVSKY, 2000):

**Tabela 2.2 - Tipos de centrífuga e suas características.**

Tipo de centrífuga	Força centrífuga (g)	Velocidade de rotação (rpm)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Torta
Tubular	1400 – 6500	5000 (max)	4 (max)	Pastosa, Firme
Cesta	1600	450 – 3500	6 – 10	Firme
Discos	1400	3000 – 10000	200	Pastosa, Firme
Decantadora	2000 – 6000	1600 – 6000	Menor que 100	Pastosa, Granular

A força g (também chamada de fator g) é definida de acordo com a equação mostrada abaixo:

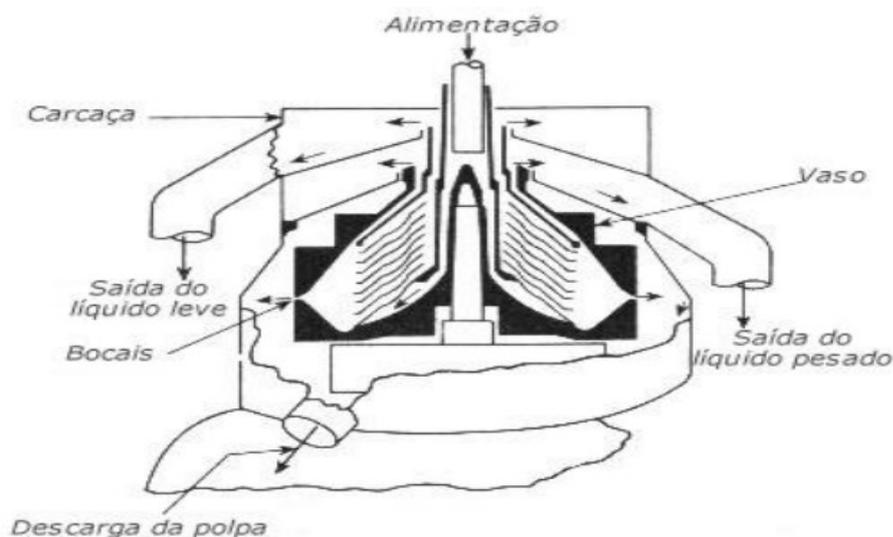
$$F_g = \frac{r\omega^2}{g} \quad (2.29)$$

Isto é simplesmente a razão da máxima força exercida sobre a partícula na suspensão e a força da gravidade exercida sobre a partícula na de mesma massa.

### 2.5.3 Centrífugas de Disco

As centrífugas com rotor de discos operam com rotações que são capazes de transmitir as partículas acelerações centrífugas entre 3000 a 10000 vezes a aceleração da gravidade. Esse

tipo de centrífuga apresenta vários discos cônicos, onde a alimentação é introduzida na tubulação central, passando por debaixo da pilha de discos, entre a pilha de discos e a parede do tambor, enquanto o conjunto (tambor e pilha de discos) imprime à mistura uma velocidade de rotação  $\omega$ . Em seguida o líquido flui em camadas finas, radialmente para dentro no sentido da saída (*overflow*), como mostrado na Figura 2.12 a seguir:



**Figura 2.12 - Representação esquemática de um corte transversal de uma centrífuga de discos.**

Geralmente essas centrífugas são usadas na clarificação e no espessamento de suspensões de partículas de  $0,1 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$ . Esse equipamento pode ser utilizado com as configurações de escoamento contínuo, semi-contínuo e batelada. Elas são capazes de operar com alimentações de produtos tóxicos inflamáveis e voláteis a uma vazão de até  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ . (SVAROVSKY, 2000).

Esse tipo de centrífuga é caracterizada por possuir cerca de 30 a 200 discos cônicos em sua configuração, separados por um espaçamento de  $0,3$  a  $300 \text{ mm}$ . Esse espaçamento dos discos depende da viscosidade e da quantidade de sólidos da alimentação. Em misturas que possuem líquidos de baixa viscosidade o espaçamento utilizado é menor que  $1 \text{ mm}$ .

Apesar das centrífugas de discos serem capazes de aceitar uma grande variedade de alimentações, elas são mecanicamente complexas e caras, além de sua limpeza mecânica ser difícil. A Tabela 2.3 apresenta dados da operação de centrifugação de algumas usinas que utilizam centrífugas de discos:

**Tabela 2.3 - Dados da operação de centrífugas de discos industriais (BICALHO, 2011).**

Usina	Concentração de leveduras (%)	Nº de discos	Configurações do equipamento			$\eta$ (%)	Queda de viabilidade celular (%)
			Velocidade de rotação (rpm)	Capacidade (m <sup>3</sup> /h)	Tempo de operação		
Alvorada (Araporã/MG)	---	---	3500	30 a 80	contínuo	65	---
Coruripe (Campo Florido/MG)	10 – 12	40	3600	90	24h	80	60
Jalles Machado (Goianésia/GO)	11	90	3600	60 - 90	24h	97	---
Catanduva (Ariranha/SP)	---	---	–	60 - 90	---	80	10-20
Furlan (Santa Bárbara do Oeste/SP)	11	70	4500	35-50-90	contínuo	93	13
Iacanga (Iacanga/SP)	11,50	74	4805	95 - 130	Até 32 hs	75	0,10-0,50

Fonte: Bicalho, 2011

## 2.6 Vinho Fermentado (mosto fermentado)

Após a fermentação, os meios açucarados passam a denominar – se de vinhos, com uma constituição variável, mas encerrando sempre substâncias gasosas, sólidas e líquidas. Os sólidos se fazem presentes pelas células das leveduras, pelas bactérias contaminantes, pelos sais minerais e impurezas sólidas em suspensão.

Os líquidos mais importantes são a água e o etanol, em porcentagens que variam de 88 a 99% e 12 a 7% respectivamente, nos vinhos comuns. Os alcoóis amílico, isoamílico, propílico, butílico, isobutílico, aldeídos, ácidos, furfurol, ésteres, e ácidos orgânicos constituem outra parcela de líquidos de pequena importância em relação ao volume, mas de grande efeito na qualidade dos destilados. (LIMA *et al.*, 2001).

Após o processo de fermentação, o vinho fermentado segue para as centrífugas, onde é separado em duas partes. Na primeira parte, é obtido o leite de levedura que após a sua diluição com água (dilui-se o leite de levedura até atingir a proporção de 1 parte de leite de levedura e 1 parte de água) é enviado para cuba de tratamento, onde essa suspensão recebe um tratamento ácido (ácido sulfúrico) até atingir um pH de 2 a 5. Feito isso, o “fermento” tratado é encaminhado para cuba de descanso, onde permanece de 2 a 3 horas antes de se iniciar um novo processo fermentativo. Uma certa porcentagem desse material é desidratado, servindo de ração animal. A segunda parte do vinho fermentado segue para a purificação nas colunas de destilação com objetivo de se produzir etanol. A Tabela 2.4 mostra algumas características do vinho

fermentado produzido por algumas usinas da região, mostrando algumas características físico químicas desse material, além de algumas características do processo de produção desse material. A Tabela 2.2 mostra os dados de operação de algumas centrífugas de disco utilizadas em algumas Usinas.

**Tabela 2.4 – Características do mosto fermentado de algumas usinas.**

Usina	Alvorada	Tijuco	Tijuco	Coruripe	Coruripe
Operação	Contínua	Batelada	Batelada	Batelada	Batelada
pH	7,12	8,4	8,16	10,29	10,37
Acidez g (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )/L	4	4,75	4,5	4,5	4,4
Porcentagem de álcool	7,12	8,4	8,16	10,29	10,37
Temperatura máxima (°C)	29,5	32	31	31	33
Brix (%)	3,23	4,2	4	3	2,4
Tempo Fermentação	–	12,33 horas	10,17 horas	11,25 horas	10,00 horas
Porcentagem de Levedo	18	10,71	12,28	10	9,52
Capacidade da Centrífuga (m <sup>3</sup> /h)	70	100	100	100	100
Vazão de leite de leveduras( m <sup>3</sup> /h)	65	55	55	–	–
Leveduras após a centrífuga (m <sup>3</sup> /h)	42	70	70	–	–

Fonte: Bicalho, 2010

## 2.7 Planejamento Experimental

A metodologia de planejamento de experimentos associada à análise de superfícies de resposta é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro. Dentre as

várias aplicações da metodologia, pode-se citar o desenvolvimento de novos produtos, otimização de rendimentos de processo, aprimoramento de metodologias analíticas, dentre outros. As principais vantagens do método são:

- ✓ Redução do número de experimentos.
- ✓ Os fatores são analisados simultaneamente.
- ✓ Possibilidade de otimização de mais de uma variável ao mesmo tempo.
- ✓ Cálculo do erro experimental.

A organização de um planejamento fatorial consiste em selecionar os fatores (variáveis do sistema) e escolher os níveis (valores assumidos pelas variáveis) que serão estudadas. O planejamento é apresentado na forma de potência, fornecendo assim o número de experimentos a ser realizados, por exemplo: um planejamento  $2^k$ , sendo  $k = 3$ , indica que dois níveis foram escolhidos para as três variáveis em estudo e que oito experimentos deverão ser realizados. Essa classe de planejamento fatorial é a mais simples e útil para descrever casos onde a situação experimental pode ser representada por uma equação de primeira ordem.

A metodologia de superfície e resposta (MSR) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas no qual a forma de relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes é desconhecida (GONÇALVES, 2011). Essa relação é representada por um modelo, como o da equação:

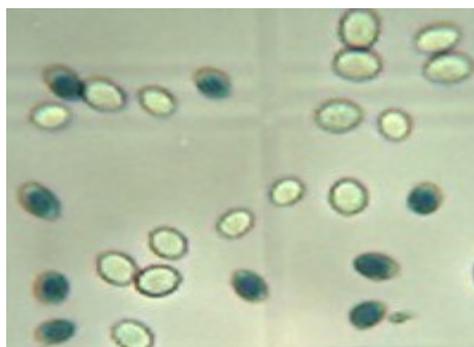
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i^k \sum_j^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.30)$$

## 2.8 Viabilidade Celular

Nos processos de separação de microrganismo, a determinação da concentração e da porcentagem de viabilidade celular (quantidade de células vivas) devem ser determinados com exatidão e precisão. A contagem das leveduras, pode ser feita de modo direto e ou indireto. O método direto, faz o uso de um microscópio, sendo o mais utilizado rotineiramente nas destilarias por ser mais fácil, barato e rápido. Já o método indireto utiliza a contagem em placas, utilizando um meio de cultivo adequado para o crescimento das leveduras. Esse método permite a visualização a olho nu da colônia de leveduras originária da célula em processo (ANDRIETTA, 2000; ALVES, 2006).

O controle da viabilidade celular, na fermentação alcoólica, pode ser feita através da contagem por meio da câmara de Neubauer na qual as células das leveduras são coradas com azul de metileno.

A quantificação celular pelo método do azul de metileno consiste na mistura de partes iguais da suspensão de leveduras e com uma solução de azul de metileno, sendo que as células com alta atividade metabólica não absorvem a coloração azul (ANTONINI, 2004). A Figura 2.13 a seguir mostra a análise de viabilidade celular:



**Figura 2.13 - Células azuis (mortas) células transparentes (vivas)**

**Fonte:** (BICALHO, 2012)

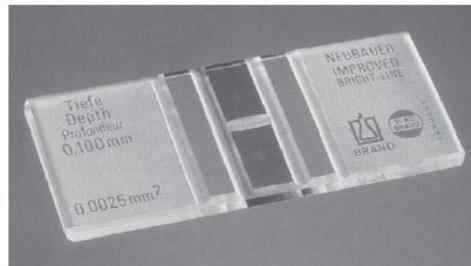
Para o cálculo da viabilidade celular em porcentagem é utilizado a relação apresentada abaixo:

$$Viabilidade\ celular = \frac{n^{\circ}\ células\ vivas}{n^{\circ}\ total\ de\ células} \times 100 \quad (2.31)$$

## 2.9 Câmara de Neubauer

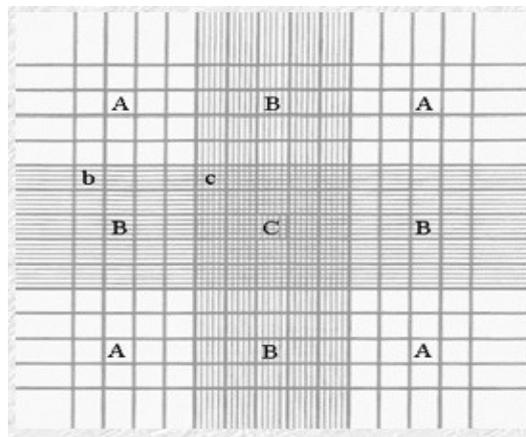
Segundo Lucarini, *et al* (2011), a câmara de Neubauer consiste em uma lâmina de microscopia, bem mais alta do que uma lâmina normal, onde existem duas câmaras gravadas no vidro (as duas partes mais escuras no centro da Figura 2.14). Ao lado das câmaras existem dois suportes (as duas barras cinza-claro ao lado das câmaras na Figura 2.14) que mantêm uma lamínula especial de quartzo exatamente a  $10^{-1}$  mm acima do chão da câmara.

Nesta câmara são gravadas marcações que a dividem em quadrantes de dimensões conhecidas. Observando-se ao microscópio, percebe-se que existem três tipos de quadrantes denominados A, B e C, que juntos formam um quadrado maior, Figura 2.15.



**Figura 2-14: Câmara de Neubauer**

**Fonte:** (LUCARINI *et. al.*, 2011).



**Figura 2-15: Quadrantes da câmara de Neubauer**

**Fonte:** (LUCARINI *et. al.*, 2011).

Pode-se notar que estes quadrantes têm subdivisões diferentes, fazendo com que o critério para escolha do quadrante onde serão contadas as células seja o tamanho das células a serem quantificadas. Assim, usualmente, células muito pequenas são contados no quadrante C, as de tamanho intermediário no quadrante B, enquanto células grandes são contadas no quadrante A.

A área total compreendida pelos 9 quadrantes é de  $9 \text{ mm}^2$ , sendo que cada quadrante (A, B e C) são quadrados de  $1 \times 1 \text{ mm}$ . Ao ser colocada a lamínula (especial para ser usada na câmara de Neubauer) a distância da lamínula até a lâmina (profundidade) mede  $0,1 \text{ mm}$ , o que permite se obter um volume de  $0,1 \text{ mm}^3$  em cada quadrante.

Com uma pipeta Pasteur, coleta-se uma pequena alíquota da suspensão preparada, sob agitação constante, e deposita-se em um dos canais laterais ao campo central, a amostra, até que todos os canais interligados estejam completos. Aguarda-se a sedimentação das células e procede-se à contagem no microscópio.

## 2.10 Trabalhos Reportado na Literatura sobre a Separação de Microrganismos em Hidrociclones

Cilliers e Harrison (1997) estudaram a performance de mini hidrociclones para a separação de leveduras considerando os efeitos da pressão, temperatura, concentração das leveduras e a geometria do equipamento, onde foi calculada a quantidade de sólidos recuperados no *underflow* e a razão entre a concentração de leveduras no *underflow* e na alimentação, para se avaliar o desempenho de separação do equipamento. Os efeitos do metabolismo celular e da viabilidade não foram estudados neste trabalho.

Foram empregados os seguintes materiais:

- ✓ Suspensão de leveduras *Saccharomyces Cerevisiae*, a uma temperatura de 21°C
- ✓ Hidrociclone da marca Mozley de 10 mm de diâmetro da parte cilíndrica, e com diâmetros de *underflow* e *vortex finder*, variando de 1 e 1,5 mm e 2, 2,6 e 3,2 mm respectivamente.

Com a concentração das leveduras fixada em 18 g/L, o aumento da pressão foi positivo em ambas as respostas estudadas (recuperação e razão de concentração). O aumento da concentração de leveduras na alimentação do hidrociclone a temperatura e pressão constante, fez com que os valores da recuperação e também da razão de concentração diminuíssem. Ao se aumentar a temperatura, aumentaram-se também os valores da recuperação e da razão de concentração.

O efeito das variáveis geométricas também foi investigado. Com o aumento do diâmetro do *underflow* de 1 para 1,5 mm, considerando a pressão, a temperatura e a concentração de leveduras (18 g/L) constantes, houve um aumento da capacidade e da recuperação, enquanto que a razão de concentração diminuiu em 50%. O aumento do diâmetro do *vortex finder*, aumentou a razão de concentração e diminuiu a recuperação.

MATA; MEDRONHO (2000) avaliaram a performance de separação de leveduras de dois hidrociclones pertencentes as famílias Bradley e Rietema, ambos com diâmetro da parte cilíndrica de 30 mm operando a uma queda de pressão de 1 a 3,1 bar.

Neste trabalho foi utilizado um mosto fermentado, que antes de ser alimentado ao hidrociclone, passou por um processo de filtração a 2 bar para que fosse avaliada a performance

dos equipamentos utilizando a suspensão de leveduras diluída (antes da filtração) e a suspensão concentrada (após a filtração). Foi avaliada também a queda de viabilidade celular.

Os resultados mostraram que os hidrociclones apresentaram baixos valores de eficiência total de separação considerando o mosto diluído (valores entre 7 e 31%), pois a densidade dessa suspensão é próxima à da água. Já o mosto proveniente do processo de filtragem apresentou valores de eficiência entre 87 e 95%, sendo que o hidrociclone da família Bradley foi o que apresentou melhores resultados.

As maiores eficiências de separação foram observadas utilizando-se as maiores quedas de pressão e a queda de viabilidade celular do processo foi de 4,7% em ambos hidrociclones.

Alves (2006), objetivando avaliar experimentalmente o desempenho de mini-hidrociclones na separação de leveduras de fermentação alcoólica (*Saccharomyces cerevisiae*), substituindo as centrífugas de separação, avaliou a influência de algumas condições operacionais, tais como: tipo de equipamento e queda de pressão, na eficiência de separação e viabilidade celular.

Para se avaliar a eficiência de separação foram utilizados os hidrociclones Bradley com diâmetros da parte cilíndrica iguais a 10, 20 e 30 mm, hidrociclone modular AKW com 10 mm de parte cilíndrica e o hidrociclone Krebs com  $\frac{1}{2}$  in de parte cilíndrica e com quedas de pressão de 2,4 e 6 atm. Os hidrociclones citados acima foram dispostos em uma configuração em série.

O material empregado foi à levedura *Saccharomyces cerevisiae*, da marca Mauri, com densidade de  $1,10 \text{ g/cm}^3$  (dado fornecido pelo fabricante).

Em relação a eficiência de separação o hidrociclone que obteve o melhor resultado foi o AKW, sendo que o hidrociclone Bradley apresentou maior eficiência reduzida à pressão de 6 atm. Para todos hidrociclones as maiores eficiências foram na pressão de 6 atm.

Todos os hidrociclones estudados apresentaram elevadas razões de líquido, entre 40 a 50% para o AKW, entre 30 e 39% para o hidrociclone Bradley e entre 25 a 26% para o hidrociclone Krebs.

Considerando a configuração em série, houve uma melhoria significativa de separação sendo o hidrociclone de geometria AKW, o de melhor desempenho de separação em torno de 86%.

Os valores de viabilidade celular reportados nesse trabalho ficaram em torno de 80 para os hidrociclones operando individualmente e 82% para os hidrociclones operando em série.

Pinto *et al* (2008) utilizou diferentes configurações de hidrociclone para separar células animais, onde foram separadas células selvagens do tipo CHO. Modelos matemáticos foram propostos para prever a capacidade, razão de líquido e eficiência de separação em função das variáveis geométricas e queda de pressão.

Os hidrociclones utilizados nesse trabalho foram especialmente confeccionados para a separação de células, possuindo dupla alimentação tangencial, 10 mm de diâmetro da parte cilíndrica, com possibilidade de se escolher dois diâmetros diferentes da saída do *underflow* ( $D_u$ ), sendo esses de 2 e 3 mm e três possibilidades de escolha para o diâmetro da saída do *overflow* ( $D_o$ ), nos valores de 1, 1,5 e 2 mm. Dessa forma foram utilizados seis configurações desse hidrociclone variando os diâmetros das saídas de *underflow* e *overflow*.

Para realizar a separação, foi utilizado um tanque de aço de 20 litros sendo que as células foram diluída na proporção de 1:20. A concentração de células alimentadas no hidrociclone era de aproximadamente  $6,7 \times 10^4$  cels/mL.

As saídas de *underflow* e *overflow* eram abertas para a atmosfera e as vazões desses orifícios foram medidas para se calcular a razão de líquido ( $R_L$ ) do processo. Nos experimentos, o tanque de aço era pressurizado com ar comprimido, alimentando assim a suspensão no hidrociclone.

O planejamento de experimentos foi empregado, para avaliar o efeito das variáveis geométricas e da queda de pressão, nesse caso foi utilizado um planejamento fatorial ( $2^{3-1}$ ) permitindo a obtenção dos modelos matemáticos descrevendo assim o efeito de cada variável e das interações entre elas nas respostas analisadas (capacidade, razão de líquido e eficiência de separação).

A viabilidade celular foi determinada pelo método de coração através de azul de metileno.

A eficiência de separação foi alta para 5 das 6 configurações utilizadas, variando de 97 a 99%. A configuração 3010 ( $D_u=3,0$  mm e  $D_o=1$  mm) obteve altos valores de razão de líquido. A queda de viabilidade celular para as diversas configurações dos hidrociclones foi em torno de 2,9 a 9,1% com exceção da configuração 2020 ( $D_u=2,0$  mm e  $D_o=2,0$  mm) que apresentou uma queda de viabilidade de 14,4%.

Bicalho (2011), com o intuito de otimizar o processo de separação de leveduras em hidrociclones, realizou estudos com o intuito de se avaliar a influência das variáveis geométricas e operacionais sobre o desempenho de separação desses equipamentos. Modelos

matemáticos foram desenvolvidos para avaliar o seu desempenho (Eficiência total ( $\eta$ ), Eficiência total reduzida ( $\eta'$ ), Capacidade (Q) e razão de líquido ( $R_L$ )).

Para se realizar esse trabalho, foram construídos hidrociclones em acrílico e cristal, com três módulos que permitem acoplamento.

- ✓ O módulo superior consiste no duto de *overflow*. Esse módulo possui três variantes com o diâmetro de *overflow* de 2, 3 e 4 mm.
- ✓ O módulo central consiste em duto de alimentação com diâmetro variando de 2, 3 e 4 mm
- ✓ Módulo inferior consiste no tronco de cone e saída do *underflow*, a qual variou-se o tronco de cone de 6°, 8° e 10°.

Para se realizar esses testes foram realizadas três quedas de pressão de 15, 23 e 31 psi.

O diâmetro da parte cilíndrica, do *underflow* e o comprimento do *vortex finder* foram fixados respectivamente com os seguintes valores 15, 3 e 10 mm.

Nesse trabalho foi utilizada a metodologia de planejamento de experimentos e da técnica de superfícies de resposta. Foram utilizados três níveis para cada um dos quatro fatores estudados, gerando-se assim 84 experimentos, com 3 réplicas no centro e 27 diferentes tipos de hidrociclones.

O material utilizado foi a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, da marca Mauri, cuja densidade é 1,35 g/cm<sup>3</sup>, diâmetro médio de 5,696  $\mu$ m e concentrações variando de 0,5 a 5,5%. A viabilidade celular foi analisada pelo método de coloração celular.

Os autor obtive os seguintes resultados:

✓ A capacidade dos hidrociclones foi aumentada com o aumento do diâmetro da alimentação e do *overflow*, e com a diminuição do ângulo de cone. Essa resposta também foi aumentada utilizando as maiores quedas de pressão.

✓ Diminuindo-se os diâmetros da alimentação, do *overflow* e do ângulo de cone, aliado a um aumento da queda de pressão, houve uma maximização da eficiência total.

✓ A maximização da eficiência total reduzida ocorreu da mesma forma que a eficiência total.

✓ Com a diminuição de todas as variáveis do processo (tanto geométricas como físicas) favoreceu a razão de líquido.

Após a análise das respostas, o hidrociclone “ótimo” para esse processo de separação teve as seguintes características: diâmetro da alimentação de 2 mm, diâmetro do *overflow* de 2 mm e ângulo de tronco de cone de 6°. E em termos de viabilidade celular, o hidrociclone ótimo,

apresentou quedas de viabilidade de até 2%, mantendo-se na faixa aceitável que varia de 0,08 a 2%.

Bicalho *et al.* (2013) analisaram a influência da concentração de leveduras presentes em uma suspensão e da queda de pressão da operação, na performance de um hidrociclone de acrílico com as seguintes dimensões:

- ✓ 2 mm de diâmetro da saída de *overflow* e de alimentação;
- ✓ 6° de ângulo de cone;
- ✓ 15 mm de diâmetro da parte cilíndrica;
- ✓ 10 mm de comprimento de *vortex finder*;
- ✓ 3 mm de diâmetro de *underflow*.

Para fazer a análise da performance do hidrociclone em questão, foram calculadas as variáveis de projeto (capacidade, eficiência total de separação, eficiência total reduzida e razão de líquido) em diferentes condições experimentais.

Para se realizar a separação foram utilizados, além do hidrociclone citado acima, uma suspensão de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) de 1,27 g/cm<sup>3</sup>, cuja concentração mássica (em porcentagem) variou de 0,5, 3 e 5,5%.

Foi feito um planejamento de experimentos 3<sup>k</sup>, com dois fatores (pressão e concentração de leveduras na suspensão) com duas réplicas no centro, onde a queda de pressão variou de 15 a 31 Psi.

De acordo com o planejamento de experimentos e com técnica de superfície de resposta, percebeu-se que a capacidade era influenciada apenas pela queda de pressão, sendo o efeito da concentração mássica das leveduras negligenciado. A capacidade variou 0,128 a 0,182 m<sup>3</sup>/h, sendo que os maiores valores de capacidade foram observados para as maiores quedas de pressão.

A eficiência total de separação apresentou uma variação de 81,96 a 92,19% e houve um aumento quando se aumentou a queda de pressão, e uma diminuição com o aumento da concentração das leveduras.

A razão de líquido obtida nos experimentos variou de 81,05 a 84,85%, sendo essa variável maximizada com a diminuição da concentração de leveduras e também da queda de pressão.

Na eficiência total reduzida foi observado uma grande variação (0,63 a 58,44%). Similar à eficiência total de separação, o aumento da queda de pressão aumentou a variável em questão, mas nesse caso houve uma grande influência da concentração celular, observando que um aumento na concentração das leveduras diminuía a eficiência total reduzida.

Ao se comparar o desempenho de separação do hidrociclone (81,96 a 92,19%) em relação a centrífuga industrial (em torno de 80%), Bicalho *et al.* 2013 concluíram que os hidrociclones apresentaram bons resultados, sendo um promissor equipamento para se efetuar esse tipo de separação.

Muitas propostas de alterações geométricas, e também diferentes famílias de hidrociclones vêm sendo utilizadas para se realizar a separação de leveduras de fermentação alcoólica, com o objetivo de comparar a performance de separação e queda de viabilidade celular desse equipamento em relação as centrífugas (equipamentos que atualmente realizam esse processo de separação).

Diante disto, dois hidrociclones comerciais de 10 mm( Doxie<sup>®</sup> tipo A e o AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21) surgiram como alternativa para se realizar a separação de leveduras do vinho fermentado, e no próximo capítulo, denominado “Materiais e Métodos” serão apresentados através de Figuras e Tabelas, os materiais e a metodologia utilizada para se realizar tal estudo.

## CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

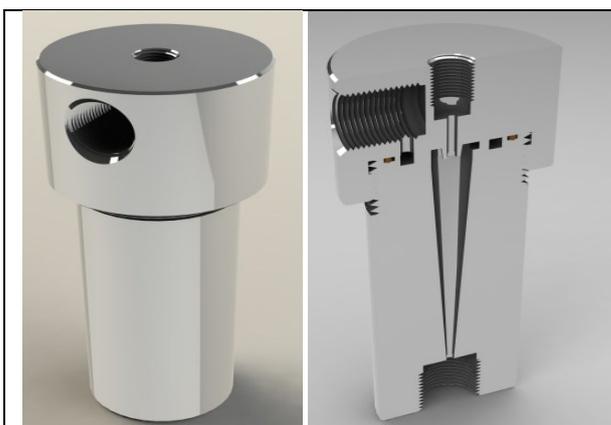
### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Hidrociclones Utilizados no Processo de Separação

Com o intuito de se avaliar a eficiência de separação das leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, presentes no vinho fermentado para uma possível substituição das centrífugas tubulares de separação (equipamento bastante utilizado pelas usinas), foram utilizados os hidrociclones comerciais das famílias Doxie<sup>®</sup> tipo A e o AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.

#### 3.1.2 Hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A

Neste estudo foi utilizado um hidrociclone Doxie<sup>®</sup> tipo A do fabricante Dorr-Oliver de 10 mm de diâmetro da parte cilíndrica, que possuía diâmetro de *overflow* de 2,4 mm e diâmetro de *underflow* de 2 mm, cuja capacidade varia de 0,2-0,4 m<sup>3</sup>/h (dados de capacidade fornecidos pelo *site* da empresa). Na fabricação do hidrociclone, duas partes em aço inoxidável 316 foram usinadas e os blocos acoplados através de roscas e *o-ring* (anel de vedação) de borracha, como ilustram as Figuras 3.1 e 3.3, que apresentam detalhadamente as dimensões do hidrociclone.

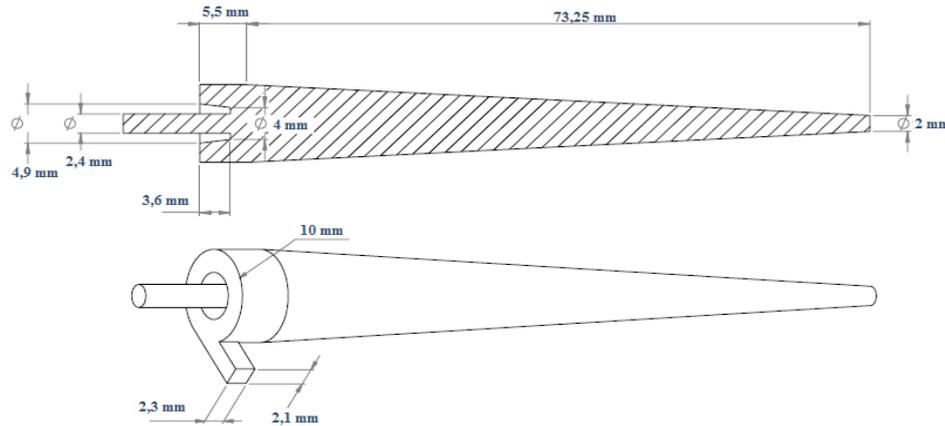


**Figura 3.1 - Vista externa e interna do hidrociclone Doxie tipo A.**



**Figura 3.2 - Válvula do tipo "agulha".**

Buscando ajustar a razão de líquido do equipamento, foi instalada, à saída do *underflow*, uma válvula do tipo agulha, a qual era manipulada para fornecer uma determinada pressão no *underflow*, e conseqüentemente uma razão de líquido (verificar os detalhes na Figura 3.2).



**Figura 3.3 - Dimensões geométricas do hidrociclone utilizado nos experimentos.**

### 3.1.3 Hidrociclone o AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.

No presente trabalho, também foi utilizado o hidrociclone AKW<sup>®</sup> do tipo RWK 21, fabricado pela empresa Shanghai AKWA+V HydrocycloneCo Ltda, confeccionado em poliestireno de 10 mm de diâmetro da parte cilíndrica, com diferentes diâmetros de *underflow*. As características do hidrociclone AKW<sup>®</sup> RWK 21, fornecidas pela empresa, estão representadas na Tabela 3.1:

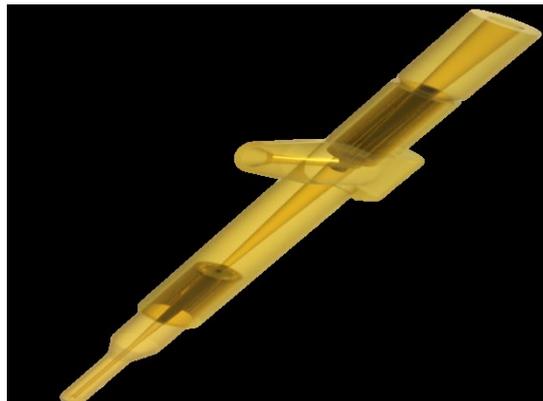
**Tabela 3.1 - Condições operacionais do hidrociclone AKW<sup>®</sup> RWK 21.**

Hidrociclone	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro de corte $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Queda de pressão (bar)	Capacidade ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
AKW <sup>®</sup> tipo RWK 21	10	2 – 4	2,5 – 4,0	0,2 – 4

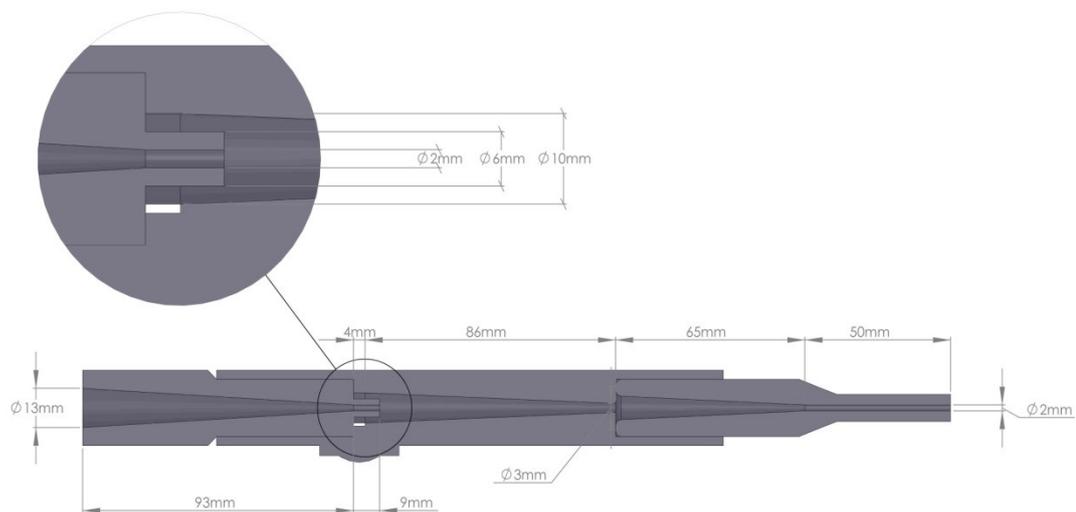
Uma ilustração do hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21 é mostrada nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, onde se pode verificar que o mesmo apresenta uma geometria pouco usual, consistindo em duas regiões cônicas interligadas a uma região cilíndrica praticamente inexistente e com comprimento suficiente apenas para acomodar a alimentação retangular.



**Figura 3.4 - Partes do Hidrociclone AKW RKW 21.**



**Figura 3.5 - Vista lateral do hidrociclone AKW RKW 21.**



**Figura 3.6 - Corte transversal do hidrociclone AKW® RWK 21 com suas dimensões.**

### 3.1.4 Vinhos Fermentados

O vinho fermentado (mosto fermentado) utilizado no processo de separação foi adquirido através de doação, pela usina Uberaba S/A, situada no Estado de Minas Gerais, a qual opera em sistemas de batelada, com uma bateria de 6 dornas de fermentação. O vinho fermentado da usina Uberaba foi utilizado devido ao fato de que, durante o processo de contagem na câmara de *Neubauer*, para se avaliar a queda de viabilidade celular, os microrganismos não flocularam, contribuindo assim para a contagem das mesmas.

O desempenho dos hidrociclones foi testado em duas etapas:

- i) A análise de desempenho do hidrociclone da marca Doxie<sup>®</sup> tipo A foi feita com uma suspensão de leveduras retirada da dorna número 4 (quatro) da Usina Uberaba, no dia 25/07/2012.
- ii) Já para avaliar o desempenho do hidrociclone AKW<sup>®</sup> RWK 21, o mosto foi retirado da dorna 6 (seis), no dia 09/09/2013.

Os vinhos fermentados foram retirados das respectivas dornas citadas acima, devido ao fato de que era a suspensão que já estava prestes a ser encaminhada para o processo de centrifugação, pois o processo de fermentação utilizado pela usina é em batelada. As características dos vinhos fermentados estão destacadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Dados fornecidos pelas usinas Alvorada e Uberaba.**

Vinho Fermentado	pH	Brix (%)	Acidez (g/l)	Levedo (%)	Teor alcoólico (A °GL)	Temperatura Dorna (°C)
Usina Uberaba (25-07-2012)	4,16	1,3	2,14	14	10,52	31
Usina Uberaba (09-09-2013)	4,19	2,14	1,39	14	8,46	31

A distribuição granulométrica do material particulado foi obtida pelo analisador de partículas por difração a *laser Mastersizer 2000* da Malvern que mede o tamanho das partículas de 0,2 a 2000 µm. Primeiramente, o sistema óptico foi calibrado através de água destilada (branco). Logo após, as amostras de vinho fermentado foram encaminhadas a esse equipamento e submetidas a um banho ultrasônico. Este banho foi necessário para garantir que os aglomerados de células presentes nas amostras se desfizessem. Com a ajuda do *software* de aquisição de dados, iniciaram-se as análises no *Mastersizer 2000*, onde as informações do

diâmetro da partícula e as suas correspondentes frações volumétricas foram enviados a uma planilha eletrônica.

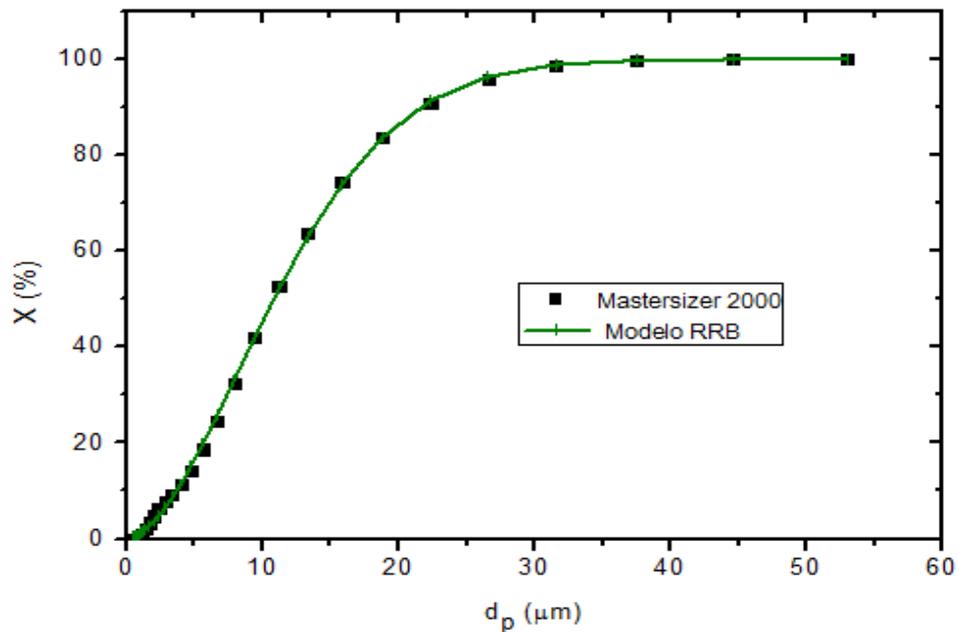
Para se representar os dados experimentais de distribuição granulométrica do mosto fermentado fornecido pela usina Uberaba SA, utilizaram-se os modelos bi-paramétricos *Rosin-Rammler – Bennet* (RRB) e o modelo Sigmóide. Estes dois modelos foram utilizados para fins de comparação, e através de regressões múltiplas utilizando-se os *softwares* EXCEL e STATISTICA® 7.1, foram calculados os parâmetros dos modelos dispostos na seção 2.2.3.

As Equações a seguir mostram modelos mencionados acima:

$$X_{(d)} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{13,353} \right)^{1,743} \right] \quad (2.2)$$

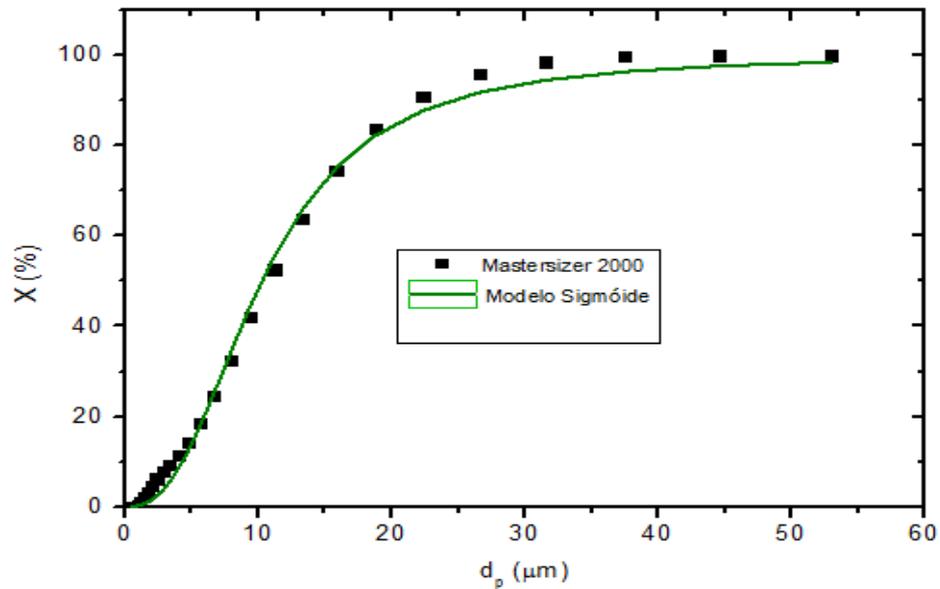
$$X_{(d)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{10,264}{d_p} \right)^{2,534}} \quad (2.5)$$

Através dos modelos matemáticos citados foram gerados gráficos, conforme as Figuras 3.7 e 3.8, para melhor visualização dos ajustes dos dados experimentais em relação a cada um dos modelos utilizados.



**Figura 3.7 - Análise granulométrica utilizando modelo RRB.**

Ao se comparar os resultados obtidos, o modelo de distribuição granulométrica que melhor se ajustou aos dados experimentais obtidos no *Mastersizer 2000*, foi o modelo *Rosin–Rammler–Bennet* (RRB).



**Figura 3.8 - Análise granulométrica utilizando o modelo Sigmóide.**

Uma ilustração do vinho fermentado utilizado nos ensaios está representada na Figura 3.9



**Figura 3.9 - Vinho fermentado usina Uberaba.**

As leveduras utilizadas no processo fermentativo para a produção de álcool pela usina Uberaba foram as de panificação que foram posteriormente isoladas e adaptadas ao ambiente

da destilaria, apresentando, assim, uma maior habilidade fermentativa, com as seguintes características:

- ✓ Alta eficiência em produção de etanol.
- ✓ Baixa produção de produtos secundários (glicerol e álcoois superiores).
- ✓ Alta resistência a fatores estressantes (contaminação)
- ✓ Maiores dimensões.

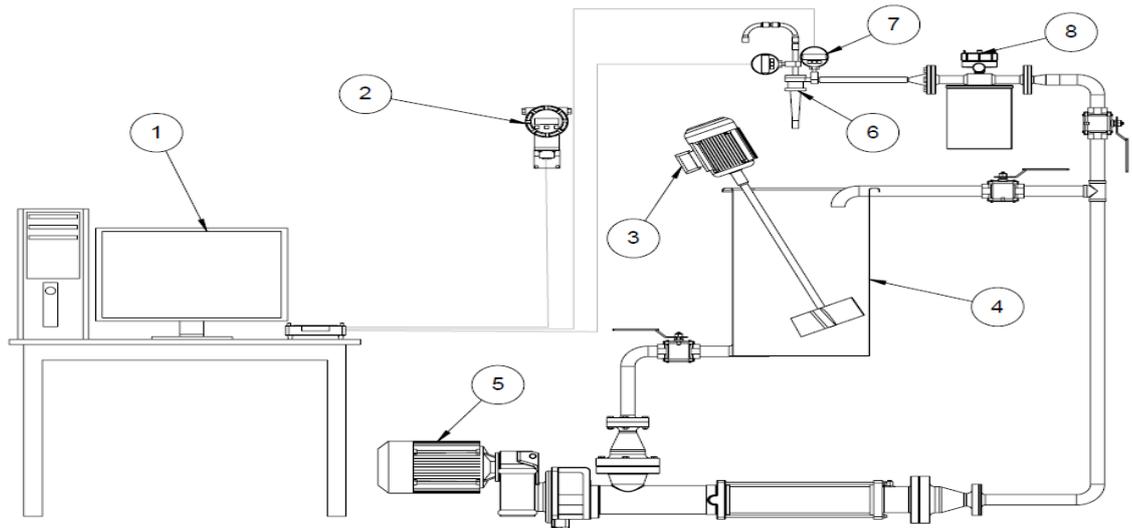
Essas leveduras, chamadas de selvagens, possuem densidade aparente de  $1,24 \text{ g/cm}^3$ , na forma granulada e seca (dados fornecidos pelo fabricante), sendo que a densidade da levedura selvagem úmida (presentes no vinho fermentado) foi calculada da seguinte forma:

- ✓ Mediu-se a massa de um tubo de ensaio acoplado a um béquer vazio;
- ✓ Em seguida, uma certa quantidade da amostra de vinho fermentado foi introduzida ao conjunto para se medir a massa da solução ( $M_s$ );
- ✓ Após se achar a massa da suspensão, o tubo de ensaio contendo o vinho fermentado foi encaminhado a uma centrífuga, e após o processo de separação, o sobrenadante foi descartado, medindo-se a massa novamente do conjunto tubo de ensaio, bécker e levedura úmida. Com isso foi calculado a massa da levedura úmida ( $M_{lu}$ ) e a massa da solução alcoólica ( $M_s$ ) presente na suspensão.
- ✓ Mediu-se a temperatura do vinho fermentado, com o intuito de se encontrar as massas específicas da água ( $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ) e do etanol ( $\rho_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}$ ).
- ✓ Encontradas as massas específicas da água e do etanol, calculou-se assim o volume de água e etanol, e a densidade da levedura úmida, cujo valor foi de  $1,17 \text{ g/cm}^3$ , sendo que, de acordo com a usina Uberaba a densidade da levedura úmida era de  $1,15 \text{ g/cm}^3$ .

O transporte do vinho fermentado foi feito através de vans cedidas pela Universidade Federal de Uberlândia. A distância percorrida para o transporte foi de 120 km (entre a Usina e a unidade experimental), a uma temperatura de aproximadamente  $25^\circ\text{C}$  para evitar a evaporação do etanol e o comprometimento do processo de separação

### 3.1.5 Unidade Experimental

Um escopo da unidade experimental utilizada está representado pela Figura 3.10. Os principais constituintes dessa unidade experimental eram:



**Figura 3.10 - Escopo da Unidade Experimental.**

1. Sistema de aquisição de dados constituído por um computador e uma placa de aquisição National Instruments M-Series USB-6251;
2. Um display de vazão mássica (sinal de saída de 4 a 20 mA);
3. Um agitador mecânico de 1,0 cv, acoplado a um inversor de frequência para o ajuste de velocidade de rotação do impelidor;
4. Um tanque construído em aço inoxidável com capacidade para 90 L; onde era armazenado o mosto fermentado para alimentação do hidrociclone e também coletadas correntes de *overflow* e *underflow*;
5. Uma motobomba helicoidal de dois estágios que opera na posição horizontal e a uma pressão de descarga de 9 kgf/cm<sup>2</sup>;
6. Hidrociclones comerciais Doxie<sup>®</sup> tipo A ou AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21;
7. Manômetros digitais indicadores de pressão na faixa de medição de 0 a 100 psi, que se encontram interligados a um computador para aquisição dos dados;
8. Um sensor de medição de vazão mássica do tipo coriólis;
9. Mangueiras de alta pressão, tubos e conexões em aço inoxidável.

### 3.2 Planejamento de Experimentos

Para se obter a melhor configuração geométrica e também os parâmetros operacionais dos hidrociclones Doxie<sup>®</sup> tipo A e do AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21, foram utilizadas as técnicas de

planejamento de experimentos e de superfícies de resposta, levando em conta a geometria (AKW), a pressão de alimentação (Doxie A<sup>®</sup> e AKW<sup>®</sup>) e a pressão do *underflow* (Doxie A<sup>®</sup>).

### 3.2.1 Planejamento de Experimentos para o Hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A

Buscando-se ajustar a razão de líquido do hidrociclone Doxie, foi instalada à saída *underflow* do equipamento, uma válvula do tipo agulha, a qual era manipulada para ajustar a pressão no *underflow* e, conseqüentemente, um valor para razão de líquido. Neste planejamento o nível inferior (-1) da variável  $X_2$  corresponde a uma posição quase totalmente aberta da válvula e o nível superior (+1) da variável  $X_2$  corresponde à válvula em uma posição mais fechada.

Para o hidrociclone Doxie<sup>®</sup> tipo A, foram variadas as pressões (variáveis independentes) na alimentação ( $X_1$ ) e no *underflow* ( $X_2$ ). As variáveis codificadas e seus respectivos valores estão representados na Tabela 3.3 a seguir:

**Tabela 3.3 - Níveis das variáveis do planejamento experimental.**

Variável codificada	Pressão na alimentação (psi)	Pressão no <i>Underflow</i> (psi)
-1	60	5
0	80	8
1	100	11

A adimensionalização das variáveis seguem as Equações (3.2) e (3.3) a seguir:

$$X_1 = \frac{P_a - 80}{20} \quad (3.2)$$

$$X_2 = \frac{P_u - 8}{3} \quad (3.3)$$

A Tabela 3.4 refere-se ao planejamento experimental a três níveis com duas variáveis e duas réplicas no ponto central, realizado para o hidrociclone Doxie<sup>®</sup> tipo A. O mesmo foi estabelecido mediante a utilização do *software* STATISTICA<sup>®</sup> 7.1, conduzindo a um total de 11 experimentos.

**Tabela 3.4 – Matriz de planejamento de experimentos para o Doxie® tipo A.**

Ensaio	$P_a$ (psi)	$P_u$ (psi)
1	60	5
2	60	8
3	60	11
4	80	5
5	80	8
6	80	11
7	100	5
8	100	8
9	100	11
10	80	8
11	80	8

### 3.2.2 Planejamento de Experimentos Hidrociclone AKW® Tipo RWK.

Para o hidrociclone da família AKW® RWK foi utilizado um planejamento em três níveis com duas variáveis, utilizando as pressões na alimentação de 60, 80 e 100 psi e diâmetros de *underflow* de 2, 3 e 4 mm. Com o intuito de diminuir o erro experimental foram realizadas mais duas réplicas no ponto central, utilizando assim, a pressão de 80 psi e o diâmetro de 3 mm para a região de *underflow*, totalizando assim 11 experimentos..

A Tabela 3.6 mostra os níveis das variáveis codificadas sendo considerado o nível inferior (-1) a pressão de alimentação de 60 psi e o diâmetro de *underflow* de 2 mm, o nível central (0) com os valores de 80 psi para a corrente de alimentação e 3 mm de diâmetro da saída de *underflow* e o nível máximo (+1) os valores de 100 psi e 4 mm. Para se adimensionalizar as variáveis foram utilizadas as seguintes expressões:

**Tabela 3.6 - Variáveis codificadas para o hidrociclone AKW® tipo RWK 21**

Variável codificada	Pressão alimentação (psi)	Diâmetro <i>Undeflow</i> (mm)
-1	60	2
0	80	3
1	100	4

$$X_1 = \frac{P_a - 80}{20} \quad (3.4)$$

$$X_2 = \frac{D_u - 3}{1} \quad (3.5)$$

A Tabela 3.7 refere-se ao planejamento de experimentos a dois níveis e dois fatores realizado para o hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.

**Tabela 3.7 – Matriz de planejamento de experimentos do hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.**

Ensaio	$P_a$ (psi)	$D_u$ (mm)
1	60	2
2	60	3
3	60	4
4	80	2
5	80	3
6	80	4
7	100	2
8	100	3
9	100	4
10	80	3
11	80	3

Os dados experimentais foram submetidos a uma análise de regressão múltipla para quantificar o efeito das variáveis principais, bem como efeitos de interação e contribuições quadráticas das respostas estudadas, permitindo a obtenção de equações empíricas. As variáveis independentes foram tratadas na forma adimensional na regressão. Foi utilizado um nível de significância de 5 % para a análise dos parâmetros da regressão. A análise estatística dos resultados e a modelagem matemática foram conduzidas com o auxílio do *software* STATISTICA<sup>®</sup> 7.1.

### 3.3 Procedimento Experimental

De acordo com o esquema representado na Figura 3.10, primeiramente os hidrociclones (Doxie<sup>®</sup> tipo A e o AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21) foram acoplados na unidade experimental e, logo após, o tanque de aço inoxidável foi preenchido com aproximadamente 50 litros de vinho fermentado.

Após a etapa de preenchimento do tanque, foi aberta a válvula de retenção de líquido da tubulação que conecta o tanque de armazenamento com a bomba helicoidal. Com a certeza de que a bomba estivesse totalmente preenchida com a suspensão, a ela foi acionada. Para garantir a homogeneização e a circulação do vinho fermentado dentro do tanque de armazenamento foi acionado o agitador mecânico.

Com o acionamento da bomba, o mosto fermentado foi encaminhado através da tubulação que possuía uma válvula de *by-pass* que dividia as correntes. Uma delas retornava ao tanque de armazenamento e a outra alimentava o hidrociclone. A vazão era medida por um sensor de medição do tipo Coriólis e a leitura era feita por um *display* conectado ao sensor.

Através da válvula, direcionava-se uma quantidade ideal de fluido ao equipamento até que o manômetro acoplado a corrente de alimentação indicasse a pressão desejada.

Para o hidrociclone Doxie, após se atingir a pressão de alimentação desejada, a válvula do tipo agulha acoplada a um manômetro foi manipulada para ajustar uma determinada pressão na saída de *underflow* e um ajuste da razão de líquido.

Já para o hidrociclone AKW, antes de se iniciar o processo, escolheu-se um dos módulos correspondente a um dos diâmetros da saída do *underflow*, montou-se o equipamento e o inseriu na unidade, logo após, a bomba helicoidal foi acionada iniciando o processo de separação.

Com o objetivo de medir os sinais de vazão mássica e pressão foi acoplado à unidade experimental um sistema de aquisição de dados (*LabView*).

Após um certo tempo do início da operação (tempo em que o sistema atingiu uma certa estabilidade volumétrica), iniciaram-se as medições experimentais. Registrou-se a temperatura no tanque para que fosse possível realizar os cálculos das características físicas do vinho fermentado.

Foram determinadas também, através de coletas cronometradas e pesagem das amostras as vazões mássicas das correntes de alimentação e de *underflow*. A vazão mássica para a corrente de alimentação foi medida, até que a vazão mássica de alimentação calculada pelo processo de coleta cronometrada fosse igual à vazão mássica mostrada no *display* de medição de vazão da Figura 3.10 (calibração do medidor). Esse processo de medida foi feito em quadruplicata, fazendo-se assim uma média dos valores encontrados para garantir uma

maior confiabilidade dos dados obtidos. É importante ressaltar que, concomitantemente à medição supracitada, ocorreu também a medição da vazão e da pressão da corrente de alimentação pelo sistema de aquisição de dados (*LabView*).

### 3.3.1 Cálculo das Concentrações Mássicas de Alimentação e de *Underflow*

Para calcular a concentração mássica das leveduras presentes no vinho fermentado na corrente de alimentação e na corrente de *underflow*, foram medidas as massas (através de uma balança analítica) de um tubo de ensaio acoplado a um béquer, ambos vazios.

Medidas as massas do conjunto (béquer e tubo), foram coletadas em quadruplicata amostras da suspensão das duas correntes supracitadas nos tubos de ensaio, medindo-se novamente a massa do conjunto, acrescentado de uma quantidade de vinho fermentado. Com os dados da massa do conjunto vazio e da massa do conjunto preenchido com a amostra, calculou-se a massa da suspensão de acordo com a seguinte equação:

$$M_s = M_{[(b+t)_{au}]} - M_{[(b+t)_v]} \quad (3.6)$$

Após a pesagem e cálculo da massa da suspensão, os tubos de ensaios com as amostras das correntes de alimentação e de *underflow*, foram encaminhadas para uma centrífuga, que separou o material mais denso (leveduras úmidas) da solução alcoólica presente no vinho fermentado. Devido à ação centrífuga, as leveduras migraram para o fundo do tubo de ensaio de acordo com as Figuras 3.11, 3.12 e 3.13.



**Figura 3.11 - Amostra de mosto fermentado antes da centrifugação.**



**Figura 3.12 – centrífuga de separação**



**Figura 3.13 - Amostra mosto fermentado após o processo de centrifugação.**

Após a centrifugação, o sobrenadante (solução alcoólica) foi descartado e a massa da levedura úmida contida no conjunto (tubo + béquer) foi pesada na balança analítica. Após essa etapa, calculou-se a massa de levedura úmida ( $M_{lu}$ ), através da diferença entre a massa do conjunto contendo a da levedura úmida e a massa do conjunto vazio. Com isso, a concentração das leveduras úmidas, tanto para a corrente de alimentação como para a de *underflow* ( $c_{wa}$ ), foram calculadas.

$$c_{wa} = \frac{M_{lu}}{M_s} \quad (3.6)$$

### 3.3.3 Cálculo das Variáveis de Desempenho dos Hidrociclones

Com os dados das vazões mássica das concentrações mássicas das correntes de alimentação e de *underflow*, foram calculadas a eficiência total de separação ( $\eta$ ), a razão de líquido ( $R_L$ ), a vazão mássica processada pelo hidrociclone (capacidade ( $W$ )) e a eficiência total reduzida ( $\eta'$ ), que são as principais variáveis associadas ao desempenho de hidrociclones, considerando as vazões mássicas das correntes de alimentação e de *underflow*, de acordo com as Equações descritas abaixo, e já mencionadas nas seções 2.2.1.

$$\eta = \frac{W_u c_{wu}}{W c_{wa}}$$

$$R_L = \frac{W_u (1 - c_{wu})}{W (1 - c_{wa})}$$

$$\eta' = \frac{\eta - R_L}{1 - R_L}$$

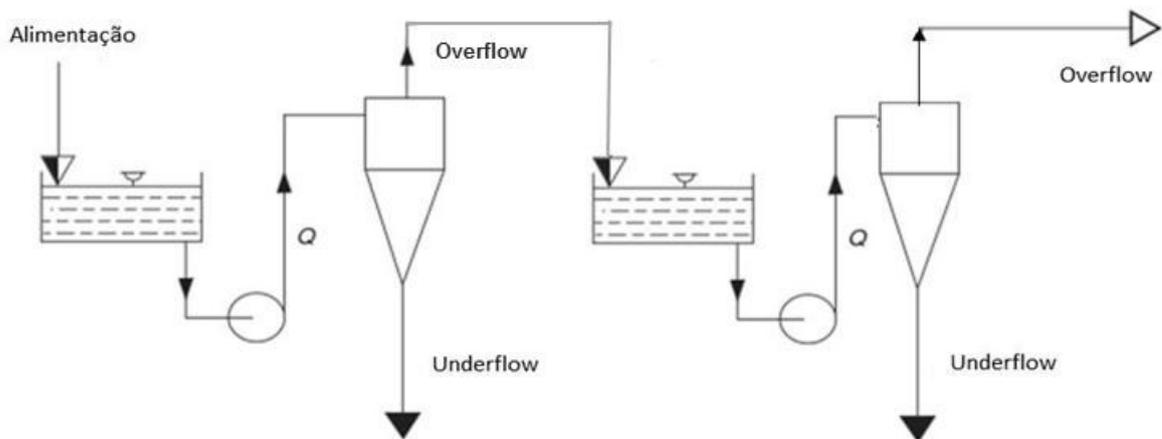
### 3.3.4 Configuração de Hidrociclones em Série

Objetivando obter a melhor eficiência de separação, foram seguidos os seguintes passos:

- ✓ Após a realização de todos os procedimentos experimentais para os hidrociclones individuais, o tanque de armazenamento foi preenchido novamente com aproximadamente 50 L do vinho fermentado.

- ✓ Foi selecionada a configuração que apresentou as melhores respostas, e o mesmo procedimento experimental realizado para se fazer a separação dos microrganismos descrito no item 3.3 foi utilizado.
- ✓ Alcançada a estabilidade volumétrica do sistema, a corrente de *overflow* foi retirada e armazenada (aproximadamente 30 litros) para o próximo experimento e o restante do mosto foi descartado.
- ✓ Descartado o restante do mosto, o tanque de armazenamento foi limpo e novamente preenchido com o fermento a suspensão proveniente da corrente de *overflow* que foi armazenado na primeira passagem.
- ✓ Acionou-se normalmente o sistema, ajustando-se a pressão de alimentação, da corrente de *underflow* para o hidrociclone Doxie.

Para o hidrociclone AKW foi feito o mesmo procedimento citado acima ajustando a pressão de alimentação e o diâmetro de saída do *underflow*. A configuração em série para os hidrociclones Doxie® tipo A e AKW® tipo RWK 21 está representada pela Figura 3.14 a seguir



**Figura 3.14 - Configuração em série para hidrociclones**

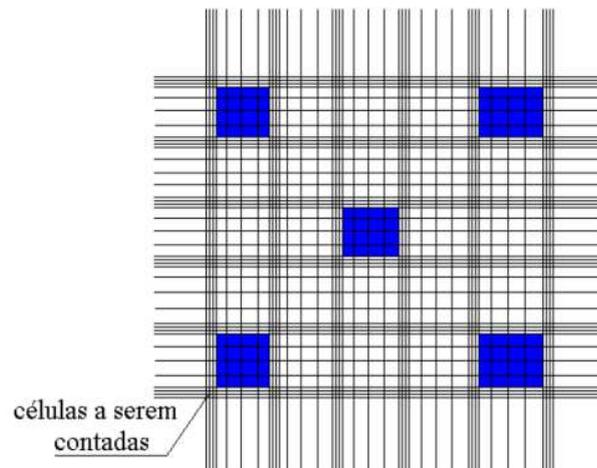
Fonte: Adaptado de SVAROVSKY, 2000 .

### 3.4 Análise da Viabilidade Celular

Com o processo de separação nos hidrociclones concluídos, foram retiradas amostras da alimentação e da corrente de *underflow* e as mesmas foram encaminhadas para a análise de viabilidade utilizando-se o método de microscopia, através da coloração dos microrganismos com azul de metileno. O procedimento para se realizar esse processo está descrito a seguir:

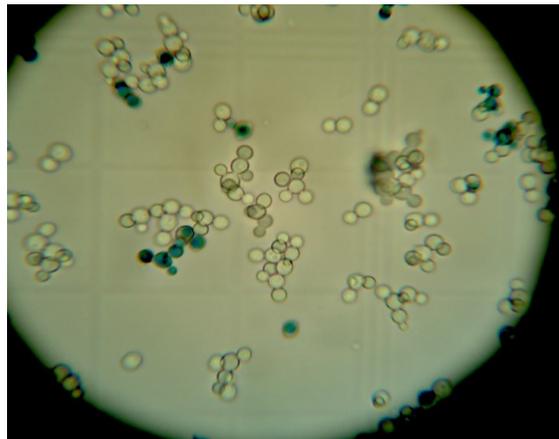
- ✓ preparou-se uma solução corante de azul de metileno (Fermentec) com 0,025 g de azul de metileno, 2 g de citrato de sódio para 100 mL de água destilada;
- ✓ dissolveu-se o azul de metileno em 10 mL de água destilada em balão volumétrico de 100 mL. Depois de dissolvido, colocou-se o citrato de sódio e completou-se o volume para 100 mL com água destilada;
- ✓ após o preparo do material de trabalho, realizou-se a higienização do local de trabalho e do material para evitar possíveis contaminações;
- ✓ realizou-se a diluição prévia da amostra na proporção de 2 mL de água destilada para 1 mL da amostra, agitando a amostra para sua homogeneização;
- ✓ pipetou-se 1 mL da amostra e acondicionando-a em um tubo de ensaio;
- ✓ pipetou-se 1 mL do corante, que foi acrescentado-a ao tubo de ensaio contendo a amostra, homogeneizando bem a mistura;
- ✓ transferiu-se uma alíquota desta mistura para a câmara de Neubauer, retirando o excesso com o auxílio de um papel toalha;
- ✓ colocou-se a lamínula sobre a câmara de Neubauer da marca Boeco, com profundidade de 1/10 mm e procedeu-se à observação das células com a ajuda do microscópio Nikon E200, na objetiva de 40x.
- ✓ para a contagem de células na amostra, contou-se o número total de células na diagonal principal e na diagonal secundária da câmara de Neubauer. Se o número de células totais contadas nas diagonais fosse superior a 500, realizava-se a contagem de células viáveis nos quadros das pontas da câmara (que contém 16 quadrículos) e o quadro do centro, totalizando a contagem em 80 quadrículos. Na Figura 3.14 observa-se um esquema simplificado da câmara de Neubauer;
- ✓ foram consideradas todas as células que estavam no interior dos quadrículos e as que estavam até 2/3 para dentro;
- ✓ foram consideradas vivas as células transparentes, pois estas eram capazes de reduzir o corante tornando-se transparentes. Já as células mortas, como não realizavam a redução do corante, ficavam coradas na cor azul (Figura 3.15);
- ✓ para o cálculo da viabilidade utilizou-se a Equação:

$$Viabilidade(\%) = \left( \frac{n^{\circ} \text{ de células vivas}}{n^{\circ} \text{ de células vivas} + n^{\circ} \text{ de células mortas}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$



**Figura 3.12 - Esquema simplificado da câmara de Neubauer.**

Através de um sistema de captura de imagens acoplado ao microscópio foi possível fazer a contagem celular de acordo com a Figura 3.16.



**Figura 3.13 - Células vivas (transparentes) células mortas (azuis).**

### 3.5 Eficiência Granulométrica

Objetivando-se avaliar o desempenho do hidrocilone AKW foram coletadas amostras das correntes da alimentação e do *underflow* para cada um dos 12 ensaios, num total de 24 amostras (alimentação e *underflow*) considerando o equipamento operando individualmente e adotando a separação em série. Foram então feitas análises granulométricas dessas correntes.

Feita a análise granulométrica das correntes de alimentação e de *underflow*, utilizando o modelo *Rousin - Rammler - Bennet* (melhor ajuste), foram plotadas as curvas de eficiência

granulométrica e foi calculado o diâmetro de corte para o equipamento utilizando as Equações (2.17), (2.18), e (2.19) descritas na seção 2.2.5.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estudo da Influência das Variáveis Operacionais e Geométricas no Desempenho de Hidrociclones

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos, buscando avaliar o desempenho de hidrociclones para a separação da levedura *Scharomyces Cerevisiae* presentes no vinho fermentado da usina Uberaba S/A. Foram utilizados os hidrociclones comerciais, Doxie<sup>®</sup> tipo A ( $D_c=10$  mm) e o AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21 ( $D_c=10$  mm), investigando-se os efeitos das variáveis operacionais (pressões de alimentação e *underflow*) e geométricas (diâmetro de *underflow*), utilizando a ferramenta de planejamento de experimentos e de análise de superfícies de resposta.

Foram analisados também os equipamentos dispostos em série, objetivando comparar os dados da eficiência total de separação alcançada pelo hidrociclone com as centrífugas tubulares (eficiência em torno de 85%). Para prever as suas performances de separação, foram avaliadas as seguintes respostas:

- ✓ Capacidade ( $W$ )
- ✓ Eficiência total de separação ( $\eta$ ).
- ✓ Razão de líquido ( $R_L$ ).
- ✓ Eficiência total reduzida ( $\eta'$ ).

Devido às altas pressões de alimentação e às tensões de cisalhamento dentro do equipamento, foi feita uma análise de viabilidade celular para garantir a real efetividade desse processo de separação.

### 4.2 Resultados dos Hidrociclones Individuais

#### 4.2.1 Hidrociclone Doxie<sup>®</sup> tipo A

Para o hidrociclone da marca Doxie foram realizados 11 experimentos, sendo 2 réplicas no centro, variando a pressão de alimentação nos valores de 60, 80 e 100 psi e a pressão na saída de *underflow* nos valores de 5, 8 e 11 psi

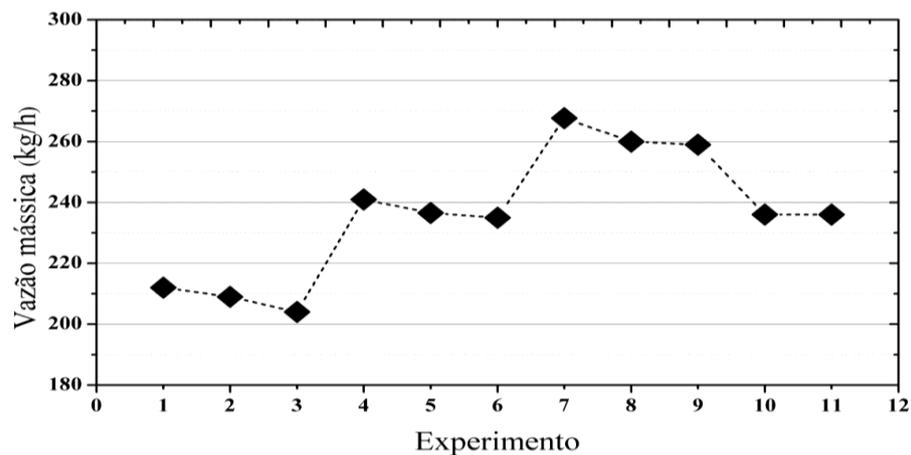
A Tabela 4.1 mostra os resultados dos experimentos realizados segundo a matriz do planejamento a três níveis ( $3^k$ ) com 2 fatores e duas réplicas no centro.

**Tabela 4.1 - Resultados experimentais para o hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A.**

Experimento	$P_a$ ( $X_1$ )	$P_u$ ( $X_2$ )	$C_{Wa}$ (%)	$C_{Wu}$ (%)	$W$ (kg/h)	$R_L$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)
1	-1	-1	20,46	24,60	212	30,62	38,82	11,82
2	-1	0	17,95	20,18	209	27,56	31,84	5,91
3	-1	1	19,77	26,32	204	11,54	16,72	5,86
4	0	-1	22,00	31,31	241	36,85	59,54	35,93
5	0	0	23,57	31,54	236	31,34	46,81	22,53
6	0	1	25,46	36,10	235	20,44	33,81	16,80
7	1	-1	24,72	34,19	268	40,39	63,87	39,39
8	1	0	26,18	34,34	260	35,82	52,83	26,50
9	1	1	25,34	33,22	259	35,48	52,01	25,62
10	0	0	21,24	28,91	236	31,86	45,15	21,71
11	0	0	26,82	34,09	236	33,41	47,16	20,65

#### Vazão Mássica de Entrada(Capacidade)

A Figura 4.1 mostra os valores da vazão mássica ( $W$ ) obtidos para as diferentes pressões de alimentação e de *underflow*, considerando o planejamento de experimentos apresentados na Tabela 3.4.



**Figura 4.1 - Vazão mássica do hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A durante os 11 experimentos.**

Ao se analisar a Figura 4.1, percebe-se uma ampla variação da vazão mássica de alimentação, sendo que as melhores repostas, foram aquelas que utilizaram os maiores valores de queda de pressão (maior pressão de alimentação e menor pressão de *underflow*). O maior valor encontrado foi no experimento de número 7, operando a uma vazão mássica de 268 kg/h,

utilizando as pressões de alimentação e de *underflow*, nos valores de 100 e 5 psi, respectivamente.

Para se analisar a influência das variáveis operacionais na capacidade, foram aplicadas técnicas de regressão múltipla utilizando os dados da Tabela 4.1, com o intuito de verificar o efeito das variáveis isoladas e de suas interações que influenciam na resposta, para um intervalo de confiança de 95%. Os resultados estão dispostos na Tabela 4.2 a seguir:

**Tabela 4.2 - Resultados da regressão para a vazão mássica.**

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	236,015	4,05E-19
$X_1$	26,944	1,56E-10
$X_2$	-3,777	4,75E-04

Observando-se a Tabela 4.2, o nível de significância das variáveis estudadas, percebe-se que as duas variáveis isoladamente influenciaram na resposta (nível de significância menor do que 5%), sendo que a pressão de alimentação contribui de maneira intensa na capacidade do equipamento, enquanto que o efeito da pressão no *underflow* influencia negativamente, e de forma mais branda, não existindo interação entre as duas variáveis.

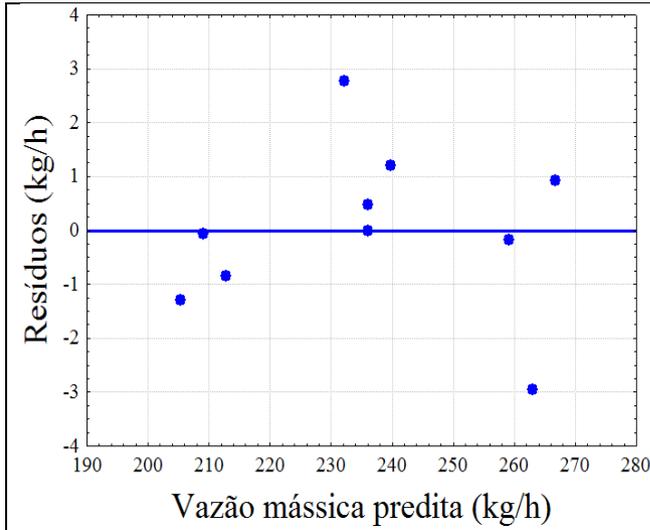
De acordo com a Tabela 4.2, e com um coeficiente de correlação igual a 0,995 ( $R^2$ ) obtido através de regressões múltiplas, foi possível estimar uma correlação, representada pela Equação (4.1), que mostra como a vazão mássica ( $W$ ) está relacionada com as variáveis analisadas.

$$W = 236,015 + 26,944 X_1 - 3,777 X_2 \quad (4.1)$$

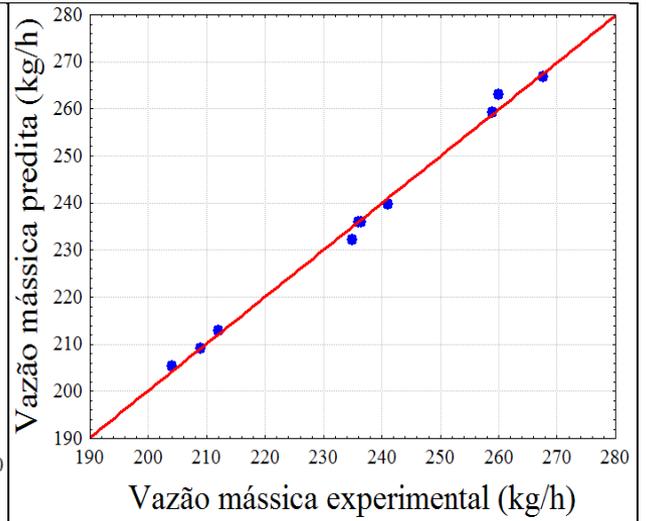
Para avaliar se a correlação matemática obtida é uma representação adequada dos dados, experimentais, foi feita uma análise residual ilustrada pela Figura 4.2, mostrando que houve uma distribuição aleatória em torno do ponto de resíduo zero (média), indicando assim a ausência de um comportamento tendencioso no ajuste do modelo.

Através do ajuste dos valores preditos em função dos valores observados, como apresentado na Figura 4.3, pode se observar que os erros dos ajustes se mostram independentes e normalmente distribuídos em torno da reta, o que corrobora normalidade para a resposta.

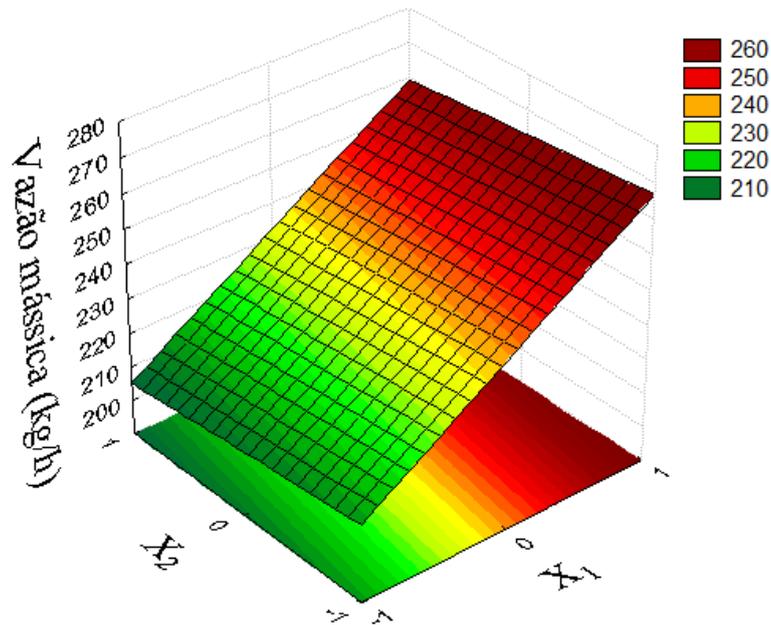
Para uma melhor análise do efeito das variáveis na vazão mássica, foi utilizada a técnica de superfície de resposta representada pela Figura 4.4



**Figura 4.2 - Análise de resíduos.**



**Figura 4.3 - Valores observados versus valores preditos.**

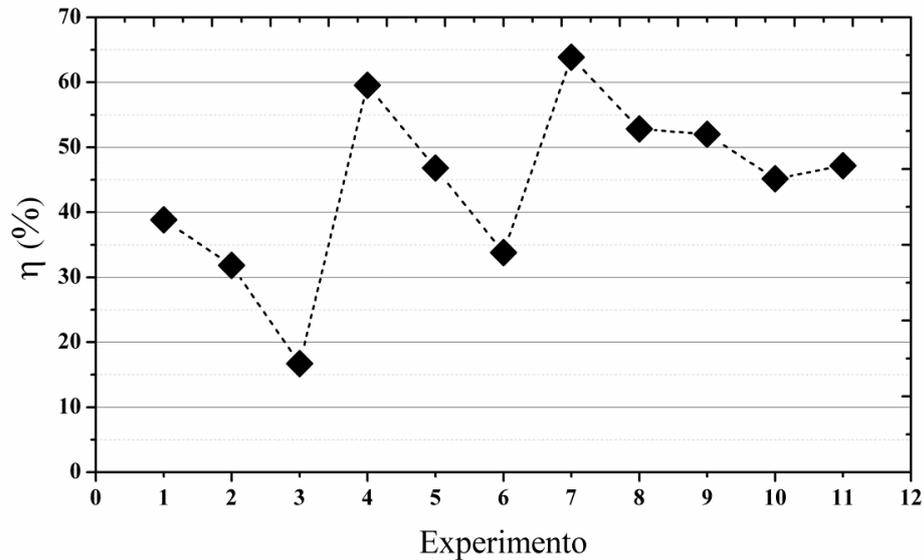


**Figura 4.4 - Superfície de resposta da capacidade.**

Pela Figura 4.4 é possível verificar que a resposta ( $W$ ) é favorecida pelo aumento da pressão de alimentação (variável codificada  $X_1$ ), e com a diminuição da pressão da corrente de saída do *underflow* (variável codificada  $X_2$ ).

## Eficiência Total de Separação

A Figura 4.5 mostra os valores encontrados para a eficiência total de separação, para os 11 experimentos.



**Figura 4.5 - Eficiência do hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A.**

De acordo com a da Figura 4.5, foi possível observar que os maiores valores da eficiência total ( $\eta > 50\%$ ) foram observados nos experimentos de número 4, 7, 8 e 9, sendo que o sétimo experimento apresentou a melhor eficiência (63,67%) operando com a maior pressão de alimentação ( $P_a = 100$  psi) e menor pressão no *underflow* ( $P_u = 5$  psi). Os menores valores ( $\eta < 40\%$ ) foram observados nos ensaios 1, 2, 3 e 6, que utilizaram a menor pressão de alimentação ( $P_a = 60$  psi). Os demais experimentos apresentaram valores intermediários ( $40\% < \eta < 50\%$ ).

Através do planejamento de experimentos e da análise de regressões múltiplas, foram obtidos os valores dos coeficientes de regressão que estão apresentados na Tabela 4.3, levando-se em conta apenas as variáveis operacionais significativas (nível de significância de 5%) que podem influenciar de maneira positiva ou negativa a eficiência total de separação com um intervalo de confiança de 95%.

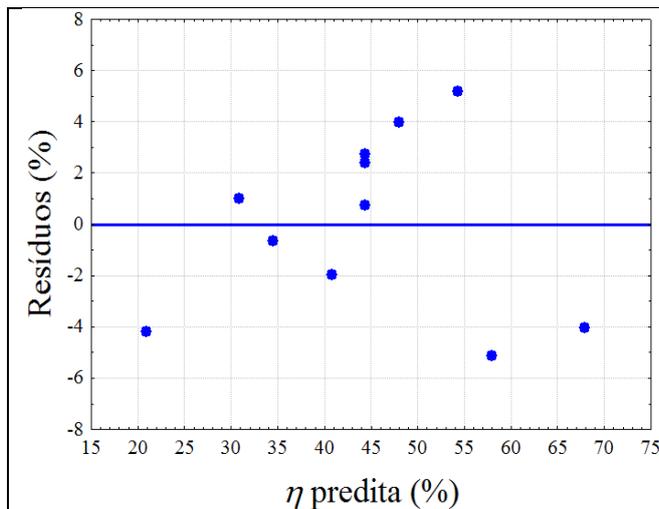
**Tabela 4.3 - Resultados da regressão para a eficiência total.**

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	44,415	2,69E-10
$X_1$	13,554	2,83E-05
$X_2$	-9,949	2,49E-04

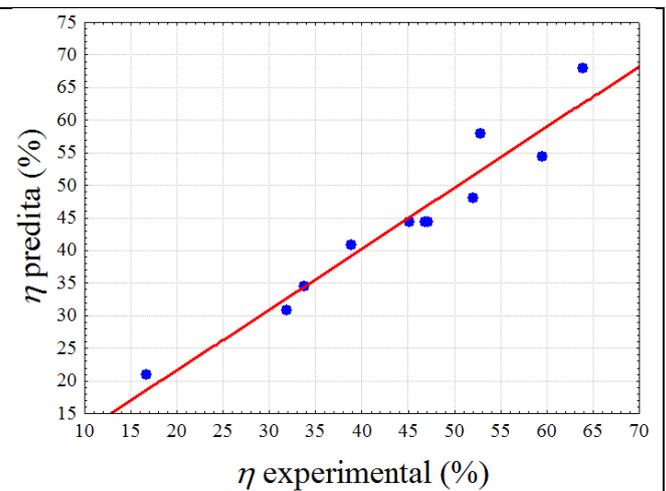
Ao se analisar a Tabela 4.3 percebe-se que de forma isolada, a pressão de alimentação age positivamente em relação a esta resposta, enquanto a pressão da saída do *underflow* influencia negativamente.

Com um coeficiente de correlação quadrático de ( $R^2$ ) de 0,932, os dados codificados podem ser representados pela Equação (4.2), que mostra o comportamento da eficiência total de separação em função das pressões de alimentação e de *underflow*. A partir dessa correlação matemática também foi possível fazer a análise residual representada pela Figura 4.6.

$$\eta = 44,15 + 13,554 X_1 - 9,949 X_2 \quad (4.2)$$



**Figura 4.6 - Análise de resíduos para a resposta  $\eta$ .**



**Figura 4.7 - Valores preditos versus valores observados para a resposta  $\eta$ .**

A análise residual apresentada na Figura 4.6 mostra que o modelo matemático utilizado foi adequado para representar os dados experimentais, pois os pontos distribuíram-se de maneira aleatória ao longo da média.

Através da Figura 4.7, que mostra um ajuste dos valores preditos em função dos valores experimentais, nota-se que os erros dos ajustes foram independentes e igualmente distribuídos ao longo da reta, o que confirma a normalidade para a resposta.

Através da análise da superfície de respostas apresentada pela Figura 4.8, que mostra como as pressões de alimentação e de *underflow* influenciam na eficiência total de separação, observa-se que para se maximizar a resposta  $\eta$ , deve-se aumentar a variável codificada  $X_1$  ( $P_a$ ), e em contrapartida diminuir a variável  $X_2$  ( $P_u$ ).

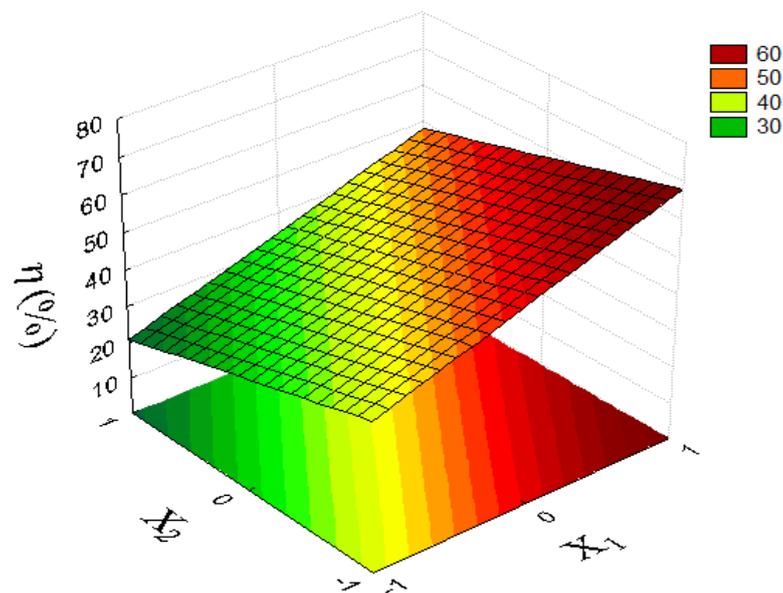
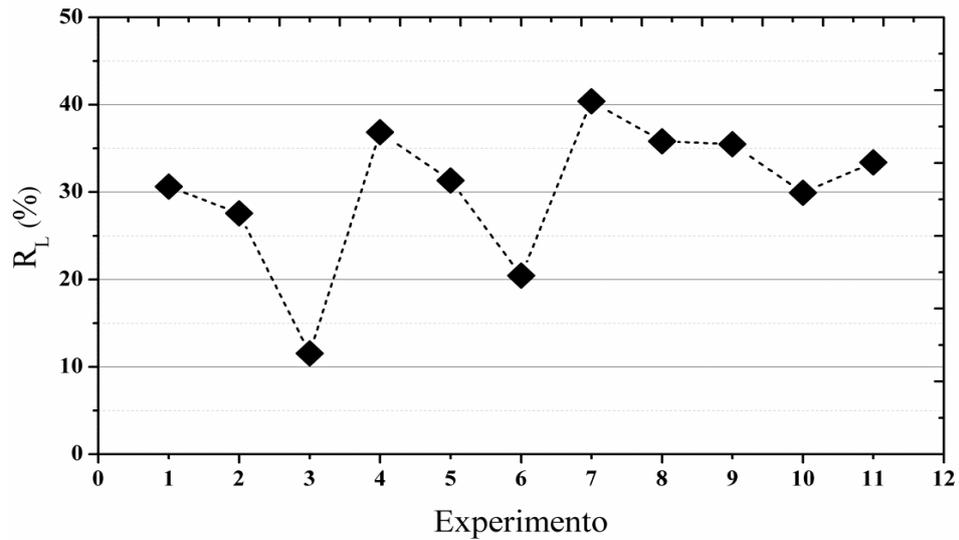


Figura 4.8: Superfície de resposta correspondente a eficiência total de separação.

### Razão de Líquido

A Figura 4.9 mostra o comportamento da Razão de Líquido ( $R_L$ ) durante os experimentos. Esta resposta é definida como a relação da quantidade de líquido (solução alcoólica presente no vinho fermentado) que sai na corrente de *underflow* pelo líquido alimentado no hidrociclone. De acordo com o gráfico, é possível verificar que a resposta  $R_L$  apresentou o maior valor (40,39%) utilizando as pressões de 100 psi na alimentação e a pressão de *underflow* de 5 psi (experimento de número 7). O menor valor para essa resposta (11,54%) foi observado no terceiro experimento, sendo a pressão de alimentação usada de 60 psi e a pressão de *underflow* de 11 psi. Os resultados dos demais experimentos permaneceram em valores intermediários (25% a 35%).



**Figura 4.9 - Razões de Líquido encontradas durante os experimentos.**

Com o intuito de avaliar como as variáveis operacionais influenciaram na razão de líquido do hidrociclone Doxie<sup>®</sup> tipo A, foram feitas regressões múltiplas utilizando os dados da Tabela 4.1. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 4.4 a seguir:

**Tabela 4.4 - Resultados da regressão para a razão de líquido.**

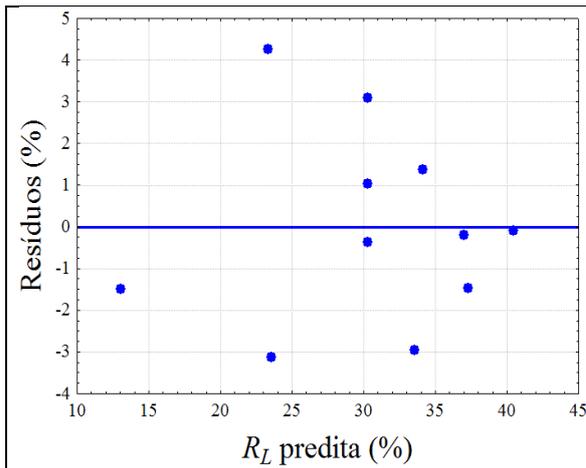
Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	30,308	3,16E-09
$X_1$	6,995	4,55E-04
$X_2$	-6,733	5,72E-04
$X_1 X_2$	3,545	3,77E-02

De acordo com a Tabela 4.4, é válido ressaltar que tanto a pressão de alimentação quanto a pressão no *underflow* influenciaram de maneira significativa na resposta, de modo que a segunda ( $P_u$ ) influenciou negativamente na eficiência total de separação. Para essa resposta houve interação entre as variáveis em questão.

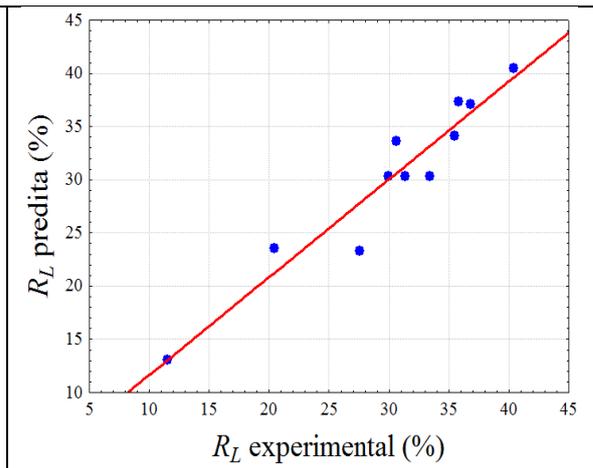
Com o quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,919, os dados da Tabela 4.4 foram dispostos na forma da Equação (4.3), que permite estimar a razão de líquido em função dos fatores estudados (na forma codificada).

$$R_L = 30,308 + 6,995 X_1 - 6,733 X_2 + 3,456 X_1 X_2 \quad (4.3)$$

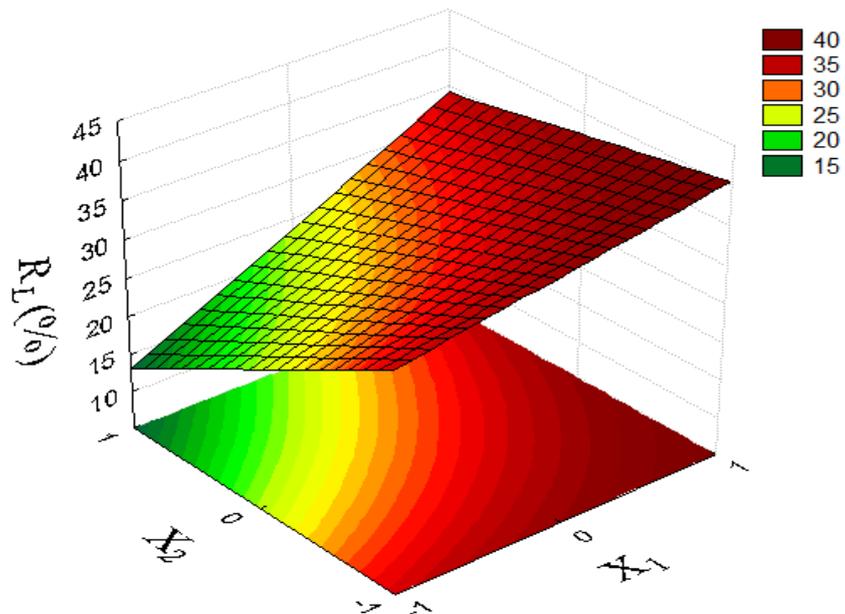
O gráfico de distribuição de resíduos da Figura 4.10 e do ajuste dos valores preditos pelos valores observados da Figura 4.11, mostram que houve uma distribuição uniforme em torno do resíduo (média zero) indicando ausência de um comportamento tendencioso, e também que os erros dos ajustes se apresentaram independentes e normalmente distribuídos ao longo da reta.



**Figura 4.10 - Análise de resíduos para a Razão de Líquido.**



**Figura 4.11 - Valores preditos versus valores observados.**

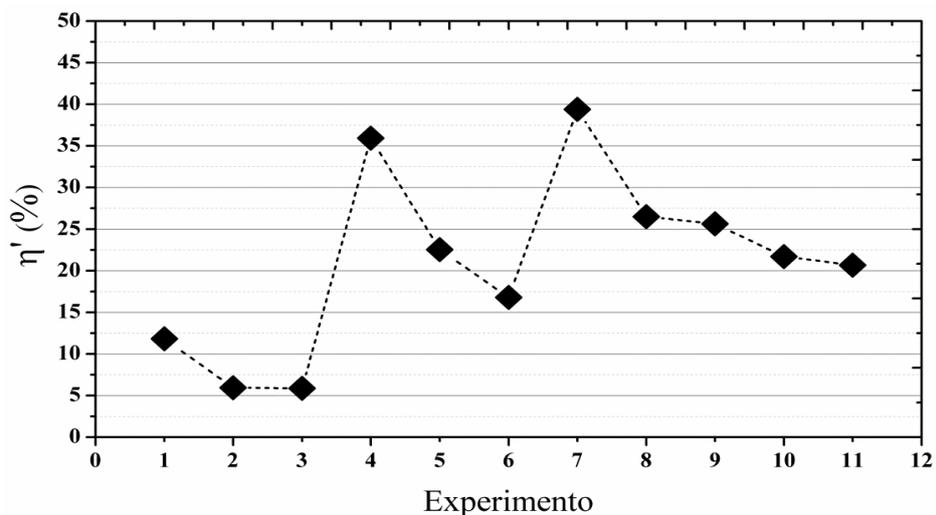


**Figura 4.12 - Superfície e resposta correspondente a Razão de Líquido.**

Através da Figura 4.12, nota-se que a razão de líquido do hidrociclone Doxie é bastante influenciada pelas pressões de alimentação e de *underflow* e que essa resposta é minimizada (efeito desejado nesse tipo de processo de separação, devido ao fato de que na separação das leveduras do vinho fermentado o objetivo é fazer com que essas “partículas” saiam na corrente de *underflow* praticamente isenta da solução alcóolica) diminuindo-se a pressão de alimentação e aumentando a pressão na saída de *underflow*.

### Eficiência Total Reduzida

Para se estimar o potencial de separação do hidrociclone, considerando-se apenas o efeito centrífugo, foi avaliada também a eficiência ( $\eta'$ ) total reduzida durante os 11 ensaios como mostra a Figura 4.13.



**Figura 4.13 - Eficiências Totais reduzidas encontradas durante os experimentos.**

Para a eficiência total reduzida, percebe-se um comportamento similar ao da eficiência total de separação. Os melhores resultados foram observados nos experimentos 4 e 7 (eficiências reduzidas maiores que 30%) para pressões de alimentação de 80 e 100 psi, respectivamente e na pressão de 5 psi para a corrente de *underflow*. Os menores valores para essa resposta encontram-se nos experimentos 1 e 2 ( $\eta' < 20\%$ ), utilizando os menores valores da pressão de alimentação e de *underflow*. Os demais experimentos apresentaram valores intermediário ( $20\% < \eta' < 30\%$ ).

Para os dados dispostos na Tabela 4.1, foi efetuada uma regressão múltipla, com o intuito de verificar a influência das variáveis estudadas para esse hidrociclone, considerando um intervalo de confiança de 95% (nível de significância inferior a 5%):

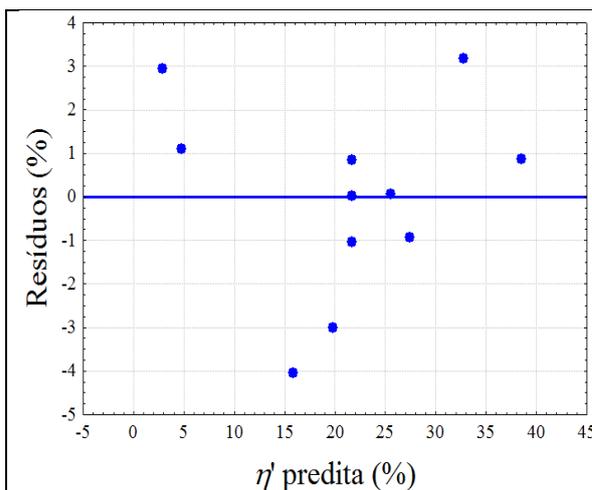
**Tabela 4.5 - Resultados da regressão para a eficiência reduzida.**

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	21,038	4,00E-07
$X_1$	11,320	6,80E-05
$X_1^2$	2,783	2,09E-02
$X_2$	-6,477	1,43E-03
$X_2^2$	-2,298	4,26E-02

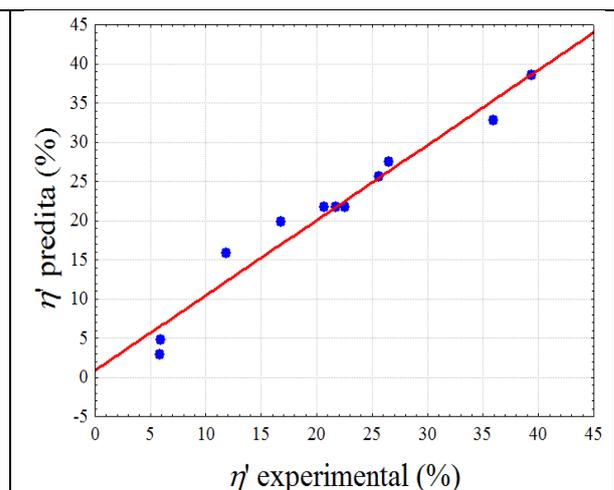
A Tabela 4.5 mostra que as duas variáveis influenciam no processo de separação, e que a variação da pressão de alimentação apresenta um efeito positivo na resposta. Em contrapartida, a pressão na corrente de *underflow* influi negativamente na eficiência total reduzida. É importante ressaltar que os termos quadráticos influenciam na resposta.

O ajuste com as variáveis codificadas é apresentado na Equação (4.4), cujo coeficiente de correlação linear obtido foi de 0,958.

$$\eta' = 31,038 + 11,302 X_1 - 6,477 X_2 + 2,783 X_1^2 - 2,298 X_2^2 \quad (4.4)$$

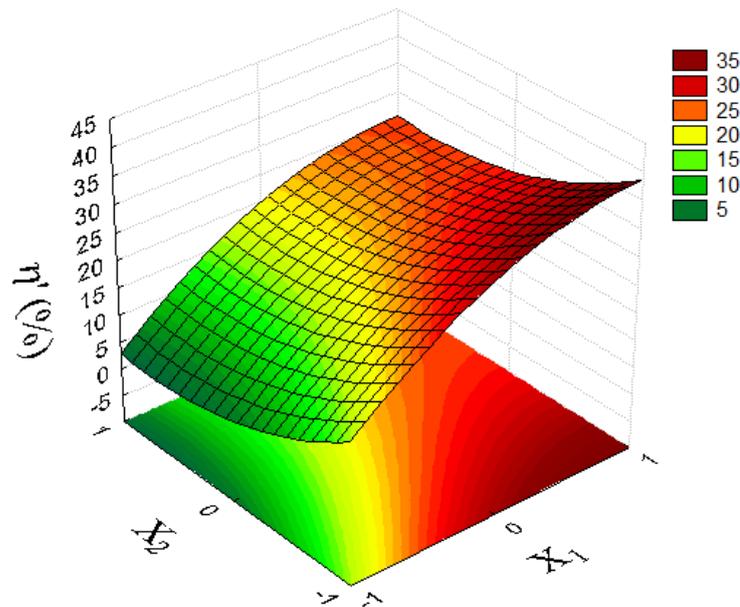


**Figura 4.14 - Análise residual para a resposta  $\eta'$ .**



**Figura 4.15 - Valores preditos versus valores observados.**

As Figuras 4.14 e 4.15 permitem analisar a distribuição de resíduos para a Equação (4.4), mostrando que houve uma distribuição uniforme em torno do resíduo zero, indicando ausência de tendências. Além disso, os erros dos ajustes se apresentaram independentes e normalmente distribuídos, concluindo-se que o modelo matemático escolhido foi representativo.



**Figura 4.16 - Superfície de resposta para a Eficiência Total de Reduzida.**

Através da superfície de resposta da Figura 4.16 é possível observar que para se maximizar a resposta  $\eta'$ , deve-se aumentar a pressão de alimentação e diminuir a pressão de *underflow*. Percebe-se também que a pressão de alimentação exerce uma grande influência na resposta, pois com o seu aumento a eficiência reduzida aumenta bruscamente, já o efeito da variação da pressão no *underflow* influencia de maneira mais sutil na resposta.

O hidrociclone Doxie operando individualmente apresentou resultados razoáveis para a separação das leveduras em relação às centrífugas que operam a uma eficiência de 70 a 85%.

### **Análise da Viabilidade Celular Utilizando o Hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A Operando Individualmente.**

Para se realizar a análise da viabilidade celular foi coletada uma amostra das correntes de alimentação e *underflow*, utilizando a configuração operacional do experimento de número

9, o qual apresentava as condições mais severas de sobrevivência para as leveduras (maiores forças de cisalhamento). Para as condições de operação supracitada a queda de viabilidade atingiu o valor de 4,8%, como mostra a Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 - Resultado da queda de viabilidade celular para o hidrociclone Doxie.**

Experimento	Pressão alimentação (psi)	Pressão <i>Underflow</i> (psi)	Viabilidade Alimentação (%)	Viabilidade <i>Underflow</i> (%)	Queda de Viabilidade (%)
9	100	11	75,20	70,36	4,84

#### 4.2.2 Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21

A Tabela 4.7 refere-se aos resultados dos experimentos realizados segundo a matriz do planejamento a três níveis e dois fatores para o hidrociclone da família AKW® tipo RWK 21.

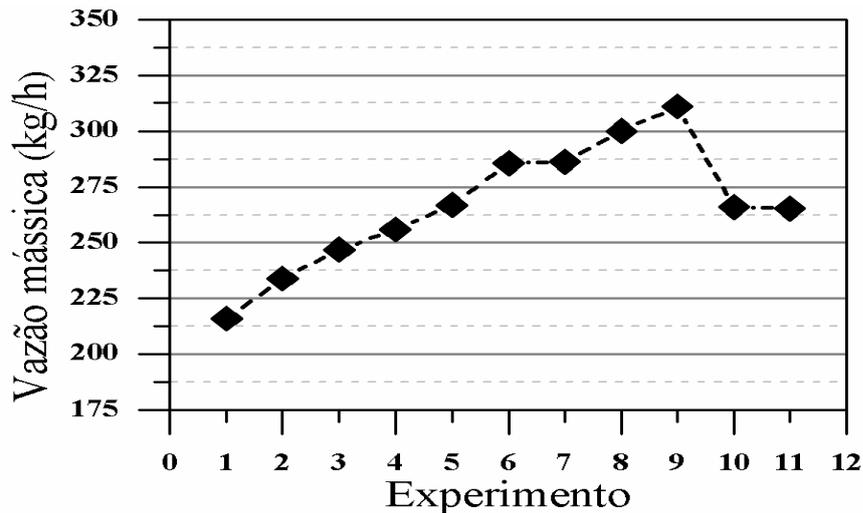
**Tabela 4.7 - Resultados experimentais para o planejamento 3 níveis com 2 fatores.**

Ensaio	$P_a$ $X_1$	$D_u$ $X_2$	$c_{Wu}$ (%)	$c_{Wa}$ (%)	$W$ (kg/h)	$R_L$ (%)	$\eta$ (%)	$\eta'$ (%)
1	-1	-1	22,48	18,66	216	49,33	62,36	25,71
2	-1	0	23,22	17,99	234	61,63	85,00	60,89
3	-1	1	16,30	14,59	247	82,07	93,60	64,29
4	0	-1	22,31	18,97	256	50,43	61,88	23,08
5	0	0	19,00	14,99	267	66,03	87,81	64,11
6	0	1	16,33	14,12	285,5	79,92	94,91	74,68
7	1	-1	26,39	21,37	286,3	50,05	66,03	31,99
8	1	0	22,44	18,71	300	69,57	87,49	58,89
9	1	1	17,68	15,13	311	81,17	97,79	88,27
10	0	0	18,44	15,03	266	68,58	87,65	60,69
11	0	0	24,52	20,20	265,3	67,54	86,71	59,06

Foram realizados 11 experimentos, variando a pressão de alimentação de 60, 80 e 100 psi, e também o diâmetro da saída de *underflow* nos valores de 2, 3 e 4 mm. E com objetivo de se diminuir os erros experimentais foram realizadas mais duas réplicas no ponto central.

### Vazão Mássica de Entrada

Os resultados da vazão mássica de entrada (capacidade) para o hidrociclone AKW, de acordo com o planejamento de experimentos apresentado na Tabela 4.7, estão indicados na Figura 4.17.



**Figura 4.17 - Vazões mássicas durante os experimentos.**

De acordo com a Figura 4.17, nota-se que houve um aumento progressivo dessa resposta com o aumento da pressão de alimentação, sendo que a maior capacidade foi observada no experimento de número 9 (311 kg/h), utilizando a máxima pressão na alimentação e também o maior diâmetro da saída do *underflow*.

Através do planejamento de experimentos e da técnica de regressão múltipla, foram encontrados os valores dos coeficientes de regressão e do nível de significância de cada uma das variáveis estudadas no processo, e de suas interações (considerando um intervalo de confiança de 95%). Esses dados estão dispostos na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 - Resultados da regressão para a vazão mássica.**

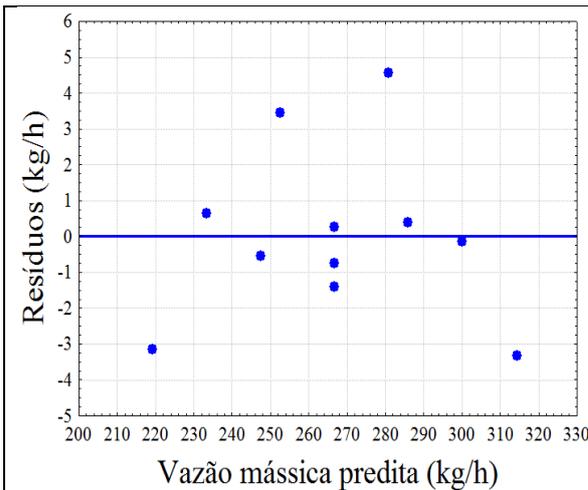
Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	266,742	7,84E-18
$X_1$	33,388	1,43E-09
$X_2$	14,194	1,17E-06

Ao se analisar a Tabela 4.8, verifica-se que houve influência das duas variáveis estudadas (pressão de alimentação e diâmetro de *underflow* e que as mesmas influenciam positivamente na vazão mássica de alimentação do processo.

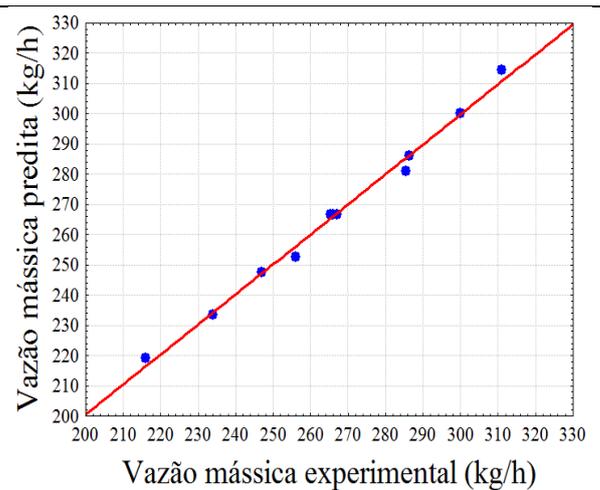
O ajuste das variáveis codificadas é representado pela Equação 4.5, cujo coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ) obtido foi de 0,997.

$$W = 266,724 + 33,389 X_1 + 14,194 X_2 \quad (4.5)$$

A análise residual da Figura 4.18 e do ajuste dos valores preditos pelos valores observados da Figura 4.19, indica que houve uma distribuição uniforme em torno do resíduo (média zero) indicando ausência de um comportamento tendencioso, mostrando também que os erros dos ajustes são independentes e normalmente distribuídos ao longo da reta.

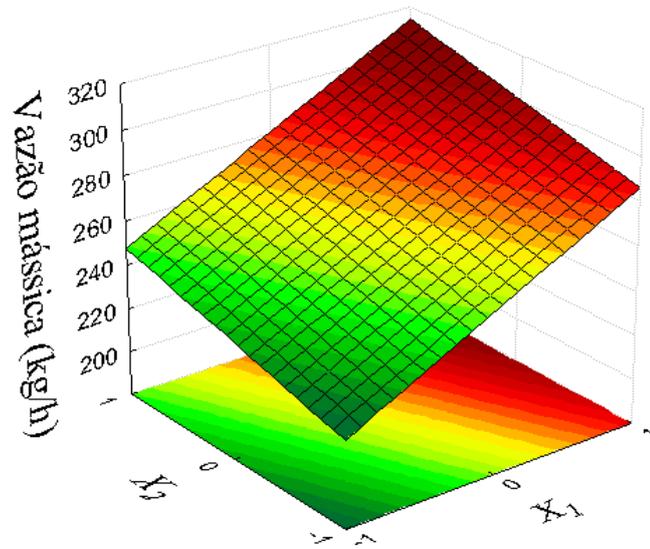


**Figura 4.18 - Análise de resíduos (AKW).**



**Figura 4.19 - Valores Preditos versus Observados.**

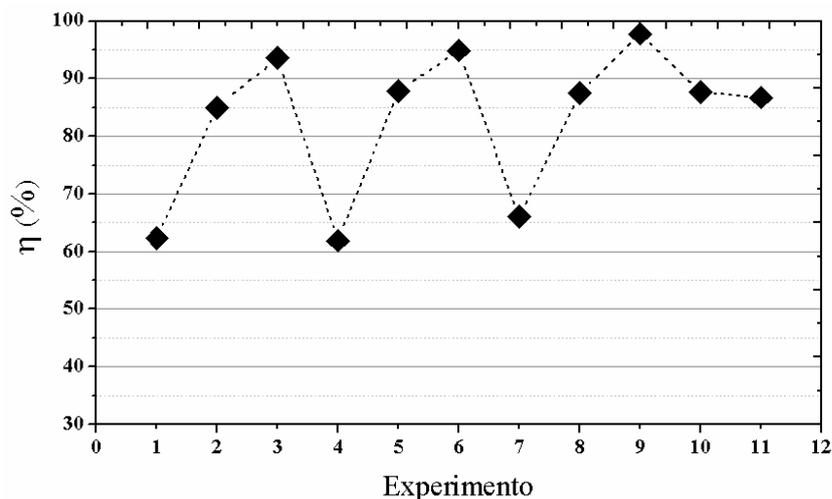
Após esta verificação, foi efetuada também a análise de superfície de resposta ilustrada pela Figura 4.20. Nota-se que houve um aumento da capacidade até um ponto de máximo, provocado pelo aumento da pressão de alimentação e do diâmetro de *underflow*, sendo que a pressão de entrada do equipamento foi a variável que mais influenciou para se obter as maiores vazões de alimentação.



**Figura 4.20 - Superfície de resposta para a vazão mássica (hidrociclone AKW).**

### **Eficiência Total de Separação**

Com o intuito de medir o potencial de separação do hidrociclone AKW, foi analisada a eficiência total de separação. De acordo com a Figura 4.21 obtida conforme os dados da Tabela 4.7, foi possível visualizar que os valores da eficiência total variaram amplamente entre as eficiências de 61,88% e 97,79%.



**Figura 4.21 - Eficiências totais de separação durante os experimentos (AKW).**

De acordo com a Figura 4.21, verificam-se três grupos, o grupo dos experimentos 1, 2 e 3, dos experimentos 4, 5 e 6 e dos experimentos 7, 8 e 9, sendo que os 2 últimos (10 e 11)

foram as repetições no ponto central (experimento 5). Comparando esses grupos, percebe-se que entre os experimentos do primeiro grupo (1, 2 e 3) há um aumento da eficiência total de separação com o aumento da pressão de alimentação, e o mesmo acontece ao se comparar isoladamente os outros grupos (grupo 4, 5 e 6 e grupo 7, 8 e 9). Fazendo-se a comparação entre os grupos, percebe-se que com aumento do diâmetro da saída do *underflow* aumenta-se a resposta de eficiência total de separação (comparação entre o grupo 1, 2 e 3 grupo 4, 5 e 6 grupo 7, 8 e 9), pois é esta a variável que predominantemente influencia sobre esta resposta.

Para se avaliar quais das variáveis influenciaram significativamente na eficiência total de separação, foi feita uma regressão múltipla, para a qual os valores e o nível de significância estão apresentados na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9 - Resultados da regressão para a eficiência total.**

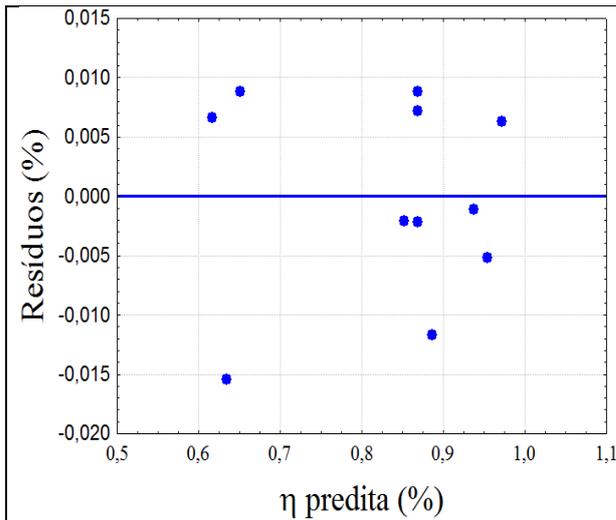
Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	0,8193	2,99E-15
$X_1$	0,0173	3,93E-03
$X_2$	0,1601	1,85E-09
$X_2^2$	0,0375	5,19E-06

A Tabela 4.9 mostra que as duas variáveis estudadas influenciaram positivamente na eficiência total de separação, sendo que o diâmetro de *underflow* influenciou de maneira individual e quadrática. A pressão de alimentação influenciou apenas de forma isolada (nível de significância inferior a 95%). É importante ressaltar também que o diâmetro da saída de *underflow* foi a variável que mais contribuiu com essa resposta.

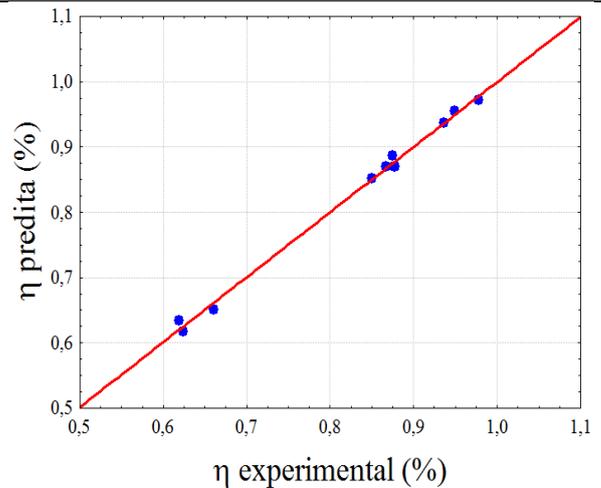
O ajuste das variáveis codificadas é representado pela Equação (4.6), cujo coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ) obtido foi de 0,995.

$$\eta = 0,819 + 0,017X_1 + 0,160X_2 + 0,037X_2^2 \quad (4.6)$$

A análise residual e o ajuste dos valores preditos pelos valores observados, de acordo com a Equação 4.6, estão ilustrados nas Figuras 4.22 e 4.23, mostrando que houve uma distribuição uniforme em torno do resíduo, indicando assim ausência de comportamentos tendenciosos, podendo observar ainda que os erros dos ajustes se comportaram independentes e normalmente distribuídos.

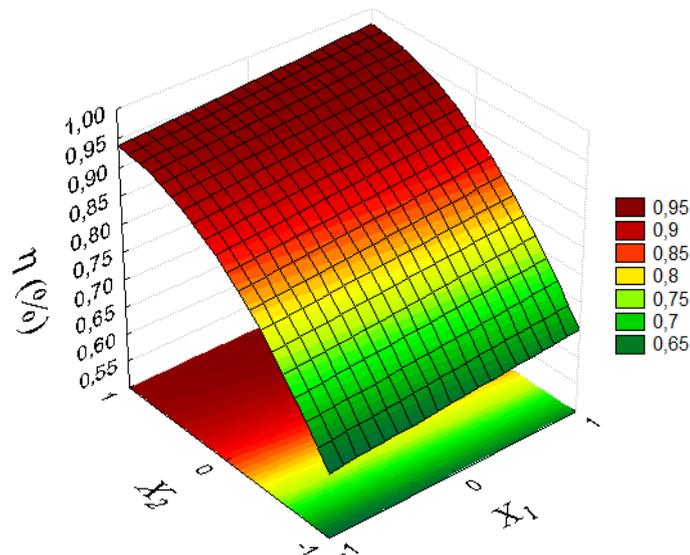


**Figura 4.22 – Análise residual para a resposta  $\eta$ .**



**Figura 4.23 – valores preditos versus valores observados para a resposta  $\eta$ .**

Utilizando-se os dados da Tabela 4.7 e a Equação (4.6) foi possível plotar o gráfico de superfície de resposta da eficiência total em função dos fatores estudados (pressão de alimentação  $X_1$ , diâmetro da saída de *underflow*  $X_2$ ) que está ilustrado pela Figura 4.24.

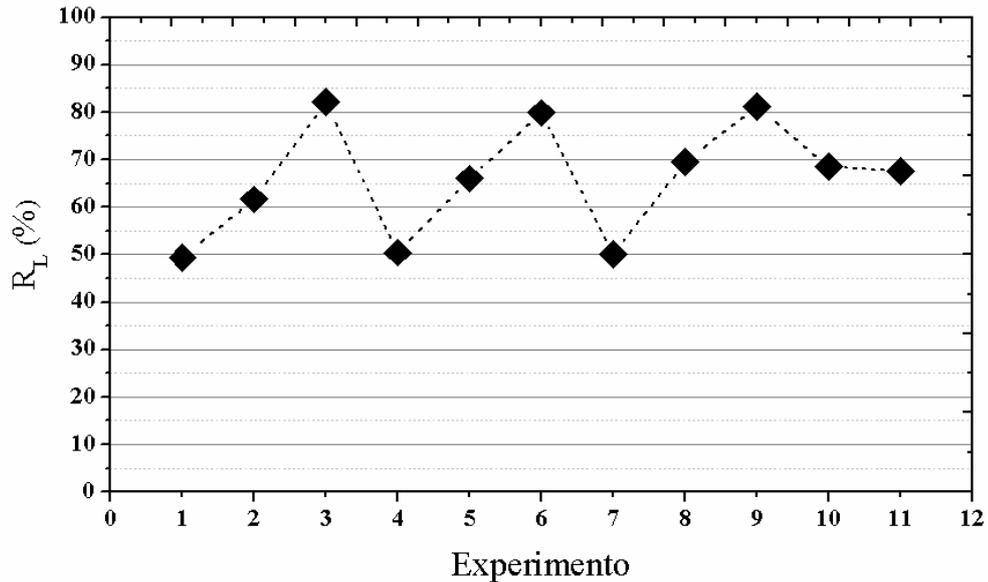


**Figura 4.24 - Superfície de resposta para a eficiência total de separação (AKW).**

Através da Figura 4.24, foi possível verificar que a eficiência total de separação cresce de maneira bastante acentuada com o aumento do diâmetro do *underflow*. Nota-se também que a pressão de alimentação influencia essa resposta, porém de uma maneira mais branda.

## Razão de Líquido

As razões de líquidos obtidas para os 11 experimentos estão dispostas na Figura 4.25, mostrando que essa resposta varia amplamente entre os valores de 49,33% (experimento de número 1) e 82,07% (experimento de número 2), de acordo com a Tabela 4.7.



**Figura 4.225 - Razão de Líquido ao longo dos 11 experimentos para o hidrociclone AKW**

Os resultados para a razão de líquido foram divididos em três faixas, os experimentos que apresentaram resultados entre 49,33% e 50,05% que foram os experimentos de número 1, 4 e 7, utilizando o menor diâmetro da saída de *underflow* (2 mm). Os que apresentaram resultados entre 61,63% e 69,675, que foram os experimentos que utilizaram diâmetro de 3 mm (experimentos 2, 5 e 8). E também os experimentos que apresentaram resultados entre 79,92% e 82,07%, experimentos 3, 6 e 9, que utilizaram o maior diâmetro da saída de *underflow* (3 mm).

Através do planejamento de experimentos e da técnica de regressões múltiplas, observa-se, de acordo com a Tabela 4.10, que apenas o diâmetro da saída de *underflow*, influencia, e de forma positiva na razão de líquido

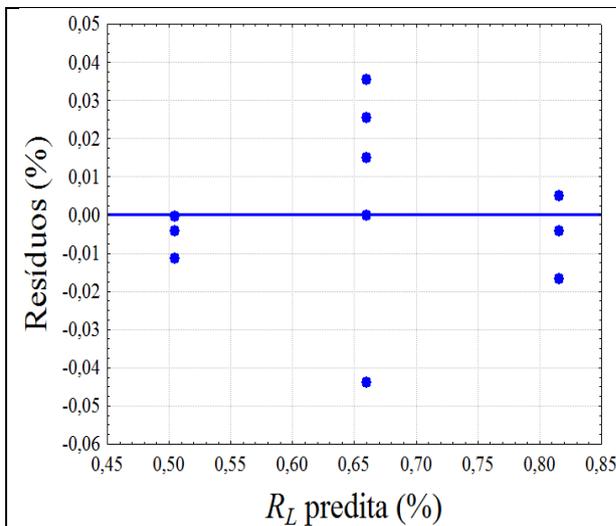
**Tabela 4.10 - Resultados da regressão para a razão de líquido.**

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	0,6603	6,31E-15
$X_2$	0,1556	3,81E-08

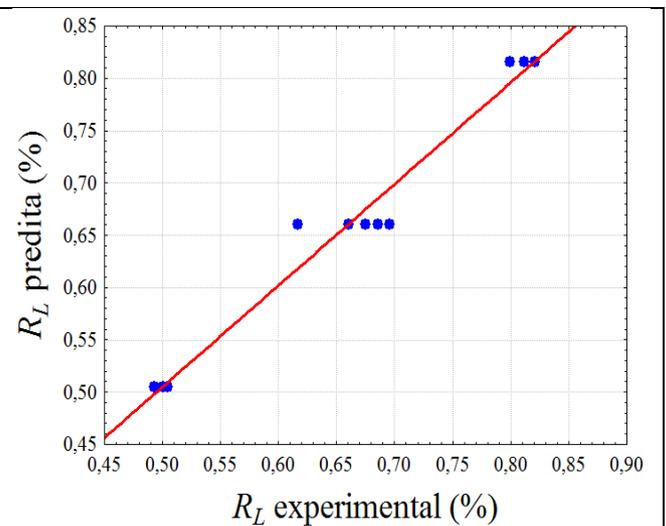
O ajuste das variáveis codificadas é representado pela Equação (4.7), de acordo com a Tabela 4.10, cujo coeficiente de correlação linear obtido foi de 0,995.

$$R_L = 0,6603 + 0,1556X_2 \quad (4.7)$$

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam uma análise da distribuição de resíduos e dos valores preditos em função dos valores observados respectivamente.



**Figura 4.26 - Análise residual para  $R_L$ .**



**Figura 4.27 - Valores Preditos X valores observados.**

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram que a distribuição foi aleatória em torno da média e sem tendências, indicando uma distribuição normal e apresentando as três faixas comentadas anteriormente. E este comportamento foi observado devido ao fato de que essa resposta depende apenas da pressão do diâmetro de *underflow*.

A superfície de resposta apresentada pela Figura 4.28, mostra como a razão de líquido variou com o diâmetro da saída do *underflow* e com a pressão de alimentação. Percebe-se que a resposta  $R_L$  foi fortemente influenciada pelo diâmetro do *underflow*, sendo que aumentando essa variável aumenta-se significativamente a resposta. A pressão de alimentação não influenciou na razão e líquido do equipamento.

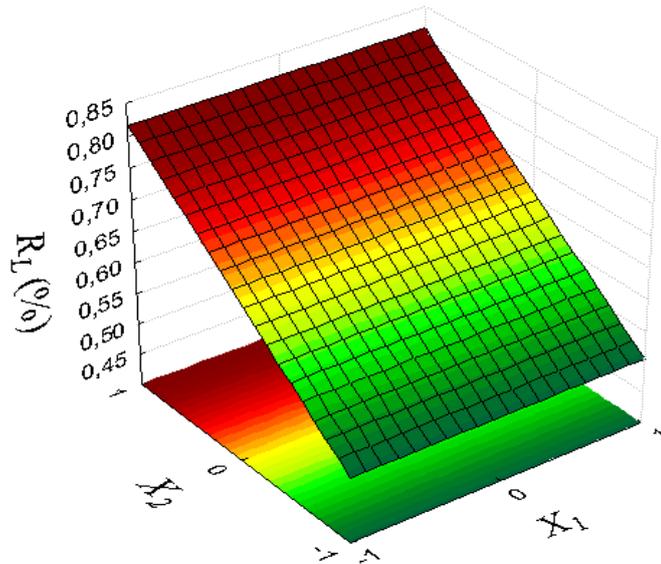


Figura 4.28 - Superfície de resposta para a razão de líquido (AKW).

### Eficiência Total Reduzida

Objetivando avaliar a performance do hidrociclone AKW® tipo RWK 21, considerando somente a ação do campo centrífugo, foi calculada a eficiência total reduzida ao longo dos 11 experimentos, conforme mostra a Figura 4.29.

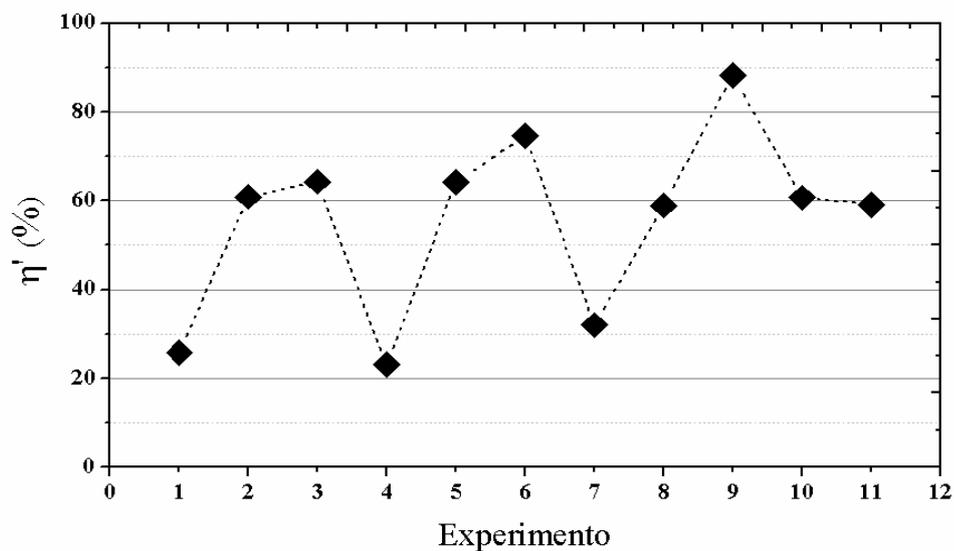


Figura 4.29 - Eficiência total reduzida ao longo dos 11 experimentos para o hidrociclone AKW.

De acordo com a Figura 4.29, percebe-se que houve um aumento gradativo da eficiência à medida que se aumentou o diâmetro da saída de *underflow*, considerando-se os experimentos de número 1, 2 e 3. Ao se utilizar novamente o nível mais baixo para essa variável ( $D_u = 2$  mm), a eficiência total reduzida diminuiu bruscamente (ensaio número 4). Esse comportamento oscilatório citado acima se manteve ao longo dos demais ensaios.

Utilizando-se o planejamento de experimentos e os resultados da Tabela 4.7 foi feita uma análise através de regressões múltiplas. A Tabela 4.11 mostra que a única variável que influencia significativamente e de forma positiva na resposta  $\eta'$  foi o diâmetro do *underflow*.

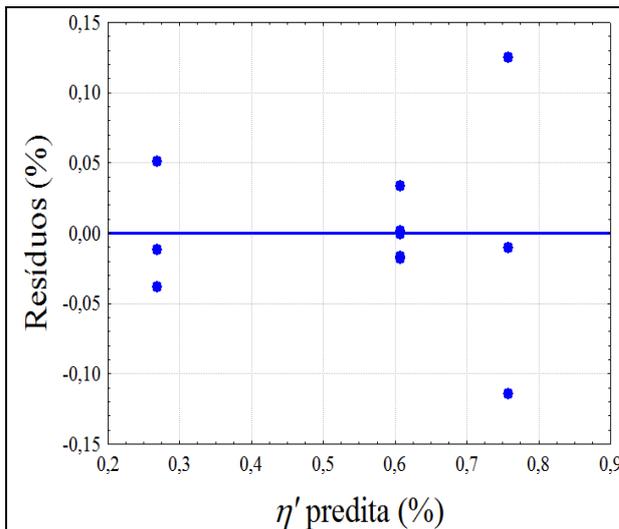
**Tabela 4-11: Resultados da regressão para a eficiência reduzida**

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	0,5447	4,31E-09
$X_2$	0,2441	1,77E-05
$X_2^2$	0,0470	4,68E-02

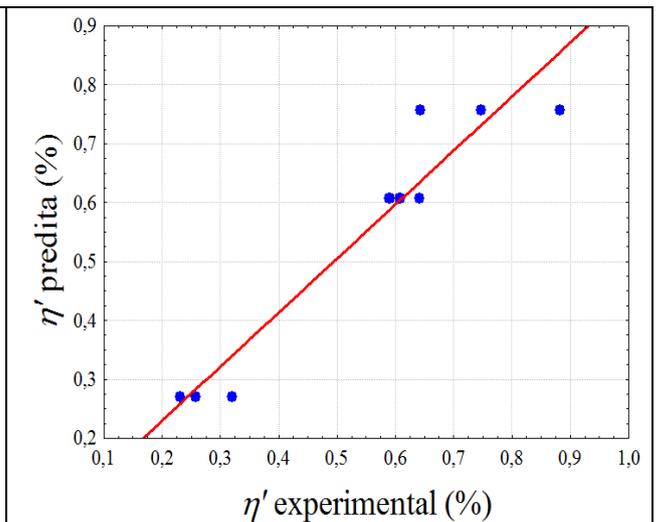
O ajuste das variáveis codificadas é representado pela Equação (4.8) cujo coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ) obtido foi de 0,916.

$$\eta' = 0,544 + 0,244 X_2 + 0,047 X_2^2 \quad (4.8)$$

As Figuras 4.30 e 4.31, mostram a análise residual e o ajuste dos valores preditos pelos valores observados. da Figura 4.31



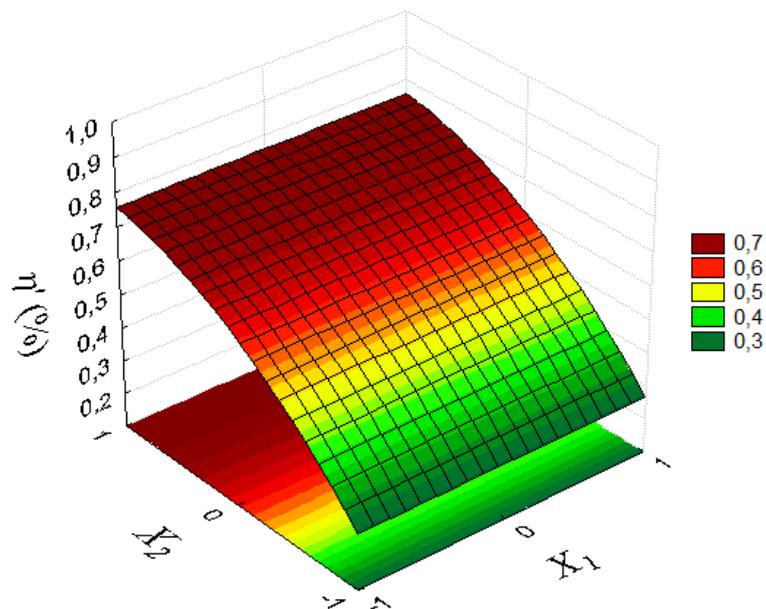
**Figura 4.30 - Análise residual para a eficiência total reduzida.**



**Figura 4.31 - Valores Preditos X valores observados.**

As Figuras 4.30 e 4.31 demonstram que houve uma distribuição uniforme em torno da média zero indicando ausência de um comportamento tendencioso, mostrando ainda que os erros dos ajustes foram independentes e normalmente distribuídos ao longo da reta.

De acordo com a correlação matemática obtida, foi possível verificar a influência das variáveis operacionais supracitadas na eficiência total reduzida, pela análise da superfície de repostas ilustrada pela Figura 4.32. Este gráfico mostra que a eficiência total reduzida foi fortemente influenciada pelo diâmetro da saída do *underflow*, aumentando essa variável, aumenta-se também a resposta  $\eta'$ . A pressão de alimentação influencia não influencia nesta resposta.



**Figura 4.32 - Superfície de resposta para eficiência total reduzida.**

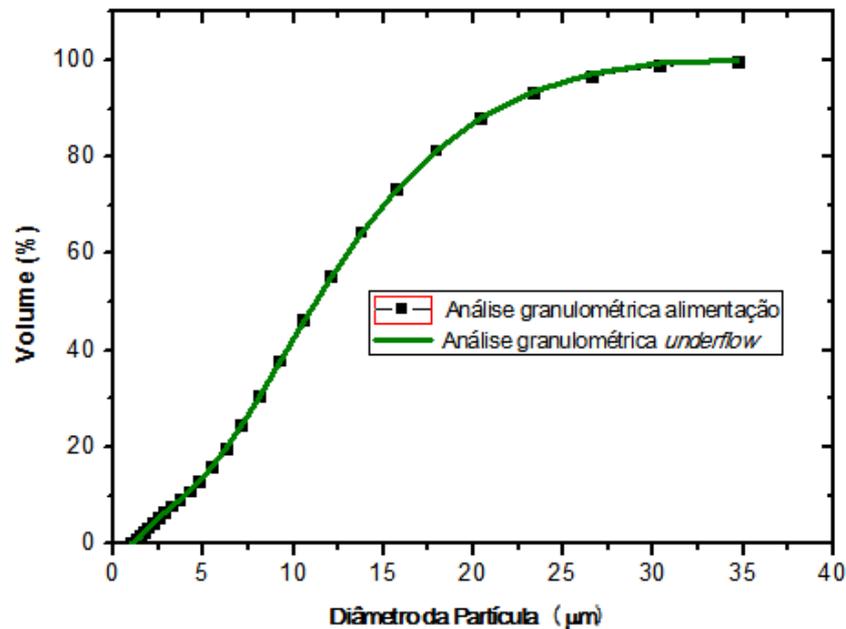
O hidrociclone AKW® Tipo RWK 21 mostrou um melhor desempenho de separação em relação as centrífugas, e também em relação ao hidrociclone Doxie, mas em contrapartida obteve elevados valores de reação de líquido.

### **Eficiência Granulométrica para o Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21**

De acordo com o planejamento de experimentos exposto na Tabela 3.6, foram realizadas análises da eficiência granulométrica para os 12 experimentos (incluindo o ensaio realizado com a configuração em série). Nessa seção será abordada de forma ilustrativa a

análise de eficiência granulométrica para o experimento de número 1 (pressão de alimentação de 60 psi e 2 mm de diâmetro de *underflow*), pois neste e em todos os demais ensaios, os valores encontrados para eficiência granulométrica foram maiores do que 50%, como mostra a Figura 4.33, não sendo possível se encontrar o diâmetro de corte do equipamento.

As análises granulométricas das correntes de alimentação e de *underflow*, para se realizar o estudo da eficiência granulométrica, estão representadas na Figura 4.33, mostrando que essa curvas se apresentam sobrepostas.



**Figura 4.33: Análise granulométrica correntes de alimentação e de underflow.**

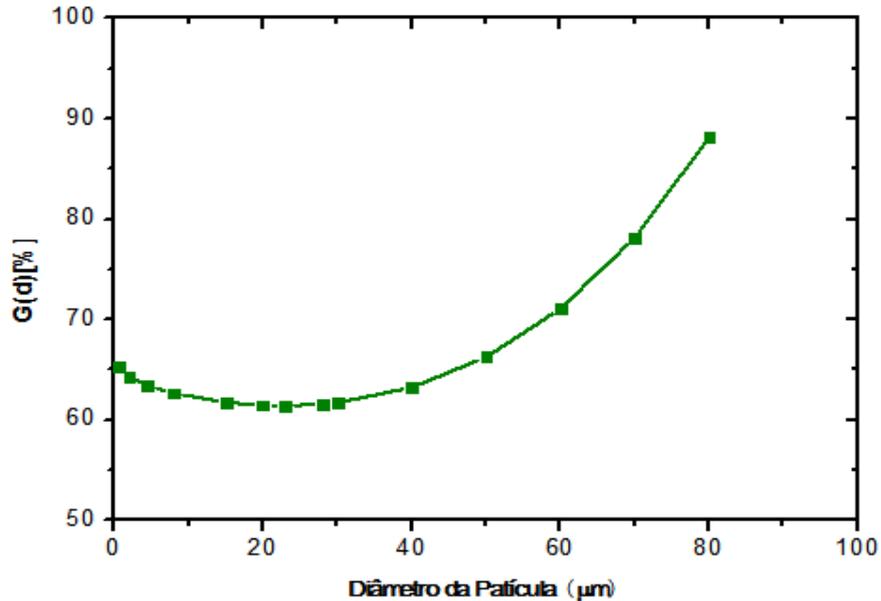
.Os parâmetros do modelo utilizado para a análise granulométrica de *Rosin – Rammeler – Bennet* (RRB) estão dispostos na Tabela 4.12 a seguir.

**Tabela 4.12: Parâmetros do modelo RRB.**

Corrente	Parâmetro $D_{63,2}$	$m$
Alimentação	13,645 µm	1,888
<i>Underflow</i>	13,557 µm	1,865

De posse dos dados da distribuição granulométrica das correntes de alimentação e de *underflow*, foi plotada a curva de eficiência granulométrica representada pela Figura 4.34. Nota-se que além de não ser possível avaliar o diâmetro de corte do equipamento, o denominado efeito *fish hook* é bem evidenciado, o que ratifica a impossibilidade de se fazer uma análise da

eficiência granulométrica para a separação de leveduras do vinho fermentado utilizando-se esse equipamento.



**Figura 4.34 - Gráfico da eficiência granulométrica X diâmetro da partícula.**

Os gráficos dos outros 11 experimentos estão ilustrados no Anexo 3

#### **Análise de Viabilidade Celular do Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21**

O intenso cisalhamento característico dos hidrociclones pode romper a parede celular dos microrganismos levando-os à morte, comprometendo, assim, a viabilidade celular do processo. Devido a esse fato, após a separação das leveduras, identificou-se a necessidade de avaliar a viabilidade celular da corrente concentrada em relação à corrente de alimentação e os resultados estão descritos na Tabela 4.13.

**Tabela 4.13 - Resultados da Viabilidade Celular do Hidrociclone AKW® Tipo RWW 21.**

Experimento	Pressão alimentação (psi)	Diâmetro <i>underflow</i> (mm)	Viabilidade Alimentação (%)	Viabilidade <i>Underflow</i> (%)	Queda de viabilidade (%)
9	100	4	56,76	44,77	6,98

Para se realizar a análise da queda de viabilidade celular foi utilizada maior pressão na alimentação (100 psi) e o maior diâmetro de *underflow* ( 4 mm), pois foi o experimento que apresentou a maior queda de pressão e maiores valores de eficiência de separação, resultando

em uma queda de viabilidade de 6,8% comparada com a centrífuga de separação que opera com quedas de viabilidade variando entre 5 a 15%. O procedimento para avaliar a queda da viabilidade celular neste experimento, foi o mesmo normalmente utilizado nas usinas de Álcool e Açúcar.

### 4.3 Hidrociclones Operando em Série

#### 4.3.1 Hidrociclone Doxie® tipo A Operando em Série

Após a separação das leveduras no hidrociclone Doxie operando individualmente, notou-se que o experimento que proporcionou os melhores resultados, em termos de eficiência de se separação foi o de número 7 (100 psi para a pressão de alimentação e 5 psi para a pressão de *underflow*). Com o intuito de se alcançar, ou até mesmo superar, a capacidade de separação das centrífugas tubulares, o hidrociclone foi disposto em uma configuração em série como ilustrado na Figura 3.13, cujos resultados estão descritos na Tabela 4.14 a seguir:

**Tabela 4.14 – Resultados utilizando o Hidrociclone Doxie em série.**

Passagem	$P_a$ (psi)	$P_u$ (psi)	$C_{Wu}$ (%)	$C_{Wa}$ (%)	$W$ (kg/h)	$R_L$ (%)	$\eta$ (%)
Primeira	100	5	33,7	25,8	275	43,17	62,87
Segunda	100	5	29,7	23,3	266,5	43,59	60,60

De acordo com os dados da Tabela 4.14, verificaram-se valores de eficiência total de separação de 62,87% na primeira passada e de 60,60% na segunda passada. As razões de líquido encontradas, na primeira e segunda passada foram de 43,17% e de 43,59% respectivamente.

Através da Equação (4.9), foi efetuado o cálculo da eficiência total de separação do sistema.

$$\eta = 1 - [(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)] \quad (4.9)$$

Para as condições operacionais analisadas o hidrociclone Doxie apresentou uma eficiência total de separação de 85,37%.

#### 4.4.2 Análise da Queda de Viabilidade Celular Utilizando o Hidrociclone® Doxie tipo A Operando em série

Para a configuração em série do hidrociclone Doxie® tipo A, também foi avaliada a queda de viabilidade celular. Os resultados estão descritos na Tabela 4.5, mostrando que houve uma queda de viabilidade na primeira passada de 4,27%, e na segunda passada uma queda de apenas 1,8%, apresentando uma queda de viabilidade global de 5,45%.

**Tabela 4.15 - Resultados da queda de viabilidade celular para configuração em série do hidrociclone Doxie® A tipo A**

Passagem	Pressão alimentação (psi)	Pressão <i>Underflow</i> (psi)	Viabilidade Alimentação (%)	Viabilidade <i>Underflow</i> (%)	Queda de Viabilidade (%)
Primeira	100	5	74,21	69,94	4,27
Segunda	100	5	72,80	71,62	1,18

#### 4.4.3 Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21 Operando em Série

O desempenho de separação do hidrociclone AKW operando em série também foi avaliado. Foi utilizado nesse experimento a pressão de alimentação de 100 psi e o diâmetro de 4 mm (mesma configuração do experimento de número 9 considerando o planejamento de experimentos apresentados pela Tabela 3.6), cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.16 a seguir.

**Tabela 4.16 - Desempenho de separação do hidrociclone AKW® tipo RWK 21 em série**

Passagem	$P_a$ (psi)	$D_u$ (mm)	$C_{Wu}$ (%)	$C_{Wa}$ (%)	$W$ (kg/h)	$R_L$ (%)	$\eta$ (%)
Primeira	100	4	17,68	15,13	311	81,17	97,79
Segunda	100	4	12,80	10,54	316	79,60	99,21

De acordo com a Tabela 4.16, verifica-se que na primeira passagem da suspensão, o hidrociclone alcançou uma eficiência de separação de 97,79%, enquanto que na segunda passagem alcançou uma eficiência total de separação de 99,21%. As razões de líquido encontradas foram de 81,17% e 76,60% para a primeira e segunda passada, respectivamente.

Com a Equação (4.9) descrita no item 4.4.1 foi calculada a eficiência total do conjunto, atingindo um valor de 99,98%.

#### 4.4.4 Análise da Queda de Viabilidade Celular Utilizando o Hidrociclone AKW® RWK 21 Operando em Série

Para se avaliar a queda de viabilidade celular, do hidrociclone AKW operando em série foi utilizada a pressão de 100 psi na corrente de alimentação e o diâmetro de 4 mm na saída de *underflow*.

A Tabela 4.17 mostra que na primeira passagem do mosto fermentado pelo hidrociclone, houve uma queda de viabilidade de 3,20%, e na segunda passada houve uma queda de viabilidade de 3,42%, sendo que a queda de viabilidade global apresentou o valor de 6,62%.

**Tabela 4.17 – Resultados da queda de viabilidade celular utilizando o hidrociclone AKW® RWK 21 operando em série.**

Passagem	Pressão alimentação (psi)	Diâmetro <i>Underflow</i> (mm)	Viabilidade Alimentação (%)	Viabilidade <i>Underflow</i> (%)	Queda de Viabilidade (%)
Primeira	100	4	51,82	48,62	3,20
Segunda	100	4	51,58	48,16	3,42

#### 4.5 Comparação dos Resultados do Hidrociclone Doxie® Tipo A e do Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21 (AKW X Doxie®).

Ao se comparar os resultados dos dois hidrociclones operando individualmente, nota-se que o hidrociclone AKW alcançou maiores valores de eficiência total e total reduzida (variando de 61% a 97% para eficiência total e de 25% a 88% para eficiência total reduzida), porém observa-se uma elevada razão de líquido (valores entre 49 e 61%). Já para o hidrociclone Doxie, as eficiências de separação foram menores ao se comparar com o outro equipamento (variando de 16% a 64% para a eficiência total e de 5% a 40% para a eficiência total reduzida), sendo que as suas razões de líquido foram menores que as do hidrociclone AKW® tipo RWK 21.

Ao se comparar as capacidades dos dois hidrociclones, nota-se que o AKW apresenta melhores resultados, variando de 216 a 311 kg/h, contra 204 a 267 kg/h do Doxie.

A comparação da performance de operação entre os dois hidrociclones para a separação de leveduras do vinho fermentado está ilustrada Tabela 4.18.

**Tabela 4.18 - Hidrociclone Doxie® Tipo A X Hidrociclone AKW® Tipo RWK 21**

Hidrociclone	$W$ (kg/h)	$\eta$ (%)	$R_L$ (%)	$\eta'$ (%)
AKW® Tipo RWK 21	216 – 311	61 – 97	49 – 61	16 – 64
Doxie® Tipo A	204 – 267	25 – 64	11 – 40	5 – 40

De acordo com os resultados, as melhores performances foram observadas nos ensaios de número 9 para o AKW, utilizando a maior pressão de alimentação (100 psi) e o maior diâmetro da saída de *underflow* (4 mm) e também o experimento de número 7 para o hidrociclone da marca Doxie, utilizando a maior pressão de alimentação (100 psi) e a menor pressão na saída de *underflow* (5 psi considerando a válvula agulha totalmente aberta). As características geométricas e operacionais utilizadas nesses experimentos estão dispostas na Tabela 4.19, sendo estas consideradas as condições ótimas de operações.

**Tabela 4.19 – Configurações ótimas para ambos os hidrociclones.**

Hidrociclone	Experimento	$P_a$ (Psi)	$P_u$ (Psi)	$D_u$ (mm)
AKW Tipo RWK 21	9	100	–	4
Doxie® Tipo A	7	100	5	Válvula aberta

Considerando que para se fazer a análise da viabilidade foram utilizadas as piores condições operacionais para a sobrevivência da levedura, os dois hidrociclones apresentaram resultados bastante satisfatórios, sendo que o hidrociclone da marca Doxie® tipo A apresentou sutil vantagem com uma queda de viabilidade 2% (dois pontos percentuais) menor em relação ao AKW® tipo RWK 21

#### 4.6 – Comparação entre os Hidrociclones e as Centrífugas Industriais.

Mediante o fato de que para se realizar a separação de leveduras de vinho fermentado, as centrífugas industriais devem operar com uma eficiência de separação de 80 % e uma capacidade de 70 m<sup>3</sup>/h em média (dados fornecidos pela usina Uberaba S/A), o hidrociclone AKW apresentou resultados promissores para se realizar essa operação. Utilizando a configuração “ótima” de operação (configuração que apresentou a melhor performance), cuja

eficiência de separação foi de 97,79% e a capacidade de 311 kg/h (0,265 m<sup>3</sup>/h) as usinas necessitariam de 265 hidrociclones operando em paralelo.

Com a utilização da configuração “ótima” para o hidrociclone Doxie<sup>®</sup> Tipo A, cuja eficiência de separação e a capacidade foram de 63,87% e 267,67 kg/h (0,23 m<sup>3</sup>/h) as usinas precisariam trabalhar com uma sequência de 306 hidrociclones dispostos em paralelo e 2 equipamentos operando em série.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Considerando-se os resultados obtidos pelos hidrociclones comerciais Doxie<sup>®</sup> Tipo A e do Hidrociclone AKW<sup>®</sup> Tipo RWK 21, foi possível concluir que:

- ✓ A metodologia experimental foi eficiente para se calcular a performance de ambos hidrociclones, avaliando assim as variáveis geométricas e operacionais que influenciam nas respostas de desempenho, tais como: capacidade, eficiência total, razão de líquido e eficiência total reduzida.
- ✓ Os ajustes obtidos pelo software STATISTICA<sup>®</sup> 7.1 permitiram a obtenção de equações que possibilitaram descrever o comportamento das variáveis geométricas (diâmetro de *underflow*) e operacionais (pressão de alimentação e de *underflow*) possibilitando avaliar o desempenho do equipamento.
- ✓ Foi realizada uma comparação do desempenho dos hidrociclones comerciais Doxie<sup>®</sup> tipo A e AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21 na separação de leveduras do mosto fermentado. Verificou-se que a melhor performance, considerando as condições experimentais utilizadas no presente trabalho, foi o hidrociclone AKW .
- ✓ O hidrociclone Doxie forneceu valores de eficiência total entre 16,72 e 63,87 %, razão de líquido com valores entre 11,54 e 40,39 %, eficiências totais reduzidas com valores entre 5,86 e 39,39 %, e vazões mássicas de entrada acima de 204 kg/h.
- ✓ O hidrociclone AKW forneceu valores de eficiência total entre 61,88 e 97,79 %, razão de líquido de 49,33 a 81,17 %, eficiências totais reduzidas na faixa de 25,71 a 88,27 % e vazões mássicas de entrada a partir de 216 kg/h.
- ✓ A capacidade do hidrociclone AKW foi incrementada com o uso de maiores diâmetros do *underflow*. Para o hidrociclone Doxie, a capacidade foi aumentada com o uso de menores pressões no *underflow*. O uso de altas pressões na entrada também contribuiu para o aumento desta resposta para ambos os hidrociclones.
- ✓ Para o hidrociclone AKW, as respostas razão de líquido, eficiência de separação e eficiência de separação reduzida foram somente influenciadas positivamente pela variável diâmetro do *underflow*.

- ✓ Para o hidrociclone Doxie foi observado que o incremento da pressão de entrada e o uso de menores pressões no *underflow* conduziram a um aumento dos valores de razão de líquido, eficiência total e eficiência total reduzida obtidos.
- ✓ Com a utilização da configuração em série para cada um dos hidrociclones (nas condições ótimas de operação de cada um) estudados no presente trabalho, foi possível alcançar um aumento significativo para a separação de leveduras do vinho fermentado proveniente da usina Uberaba S/A. A eficiência de separação de 97,79 % passou para 99 % utilizando o hidrociclone da marca AKW RWK 21, e para o Doxie a eficiência passou de 63,87 % para 85,37%.
- ✓ Ao se verificar as curvas de eficiência granulométrica fica passível de concluir que para o Hidrociclone AKW, além da presença bem pronunciada do efeito *fish hook*, os valores de eficiência granulométrica em relação ao diâmetro da partícula foram maiores que 50 %. Com isso não foi possível de prever o diâmetro de corte do equipamento e nem chegar a uma conclusão objetiva sobre essa variável.
- ✓ Foi alcançada no hidrociclone AKW, melhores eficiências de separação comparados com as das centrífugas, porém com elevadas razão de líquido.

#### **Sugestões para Trabalhos Futuros:**

1. Utilizar a configuração em série, onde a corrente concentrada de *underflow* seja a corrente de alimentação dos próximos hidrociclones, para que essa corrente se concentre cada vez mais, diminuindo assim a quantidade de mosto fermentado que sai na corrente de *underflow*.
2. Testar diferentes configurações dos equipamentos hidrociclones Doxie e AKW) em série.

## APENDICE 1

### Hidrociclone AKW<sup>®</sup> RWK 21

**Tabela A.1.1 – Distribuição granulométrica para o experimento primeiro ensaio considerando o planejamento de experimento. da Tabela 3.6**

Corrente de alimentação		Corrente de <i>underflow</i>	
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	X(%)	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	X(%)
0,970	0,10	0,970	0,09
1,107	0,42	1,107	0,31
1,264	0,89	1,264	0,74
1,443	1,57	1,443	1,34
1,647	2,42	1,647	2,12
1,880	3,40	1,880	3,06
2,147	4,48	2,147	4,10
2,798	6,74	2,798	6,41
3,194	7,94	3,194	7,67
4,163	10,91	4,163	10,76
4,752	13,03	4,752	12,92
5,425	15,86	5,425	15,75
6,194	19,63	6,194	19,47
7,071	24,54	7,071	24,28
9,216	37,98	9,216	37,46
10,521	46,34	10,521	45,69
12,011	55,38	12,011	54,68
13,712	64,63	13,712	63,95
15,655	73,53	15,655	72,96
17,872	81,54	17,872	81,17
20,403	88,22	20,403	88,10
23,293	93,32	23,293	93,48
26,591	96,81	26,591	97,24
30,358	98,86	30,358	99,43
34,657	99,79	34,657	100,00

**Tabela A.1.2 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o primeiro experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	65,36
2	64,33
4,5	63,42
8	62,66
15	61,75
20	61,45
23	61,40
28	61,56
30	61,71
40	63,24
50	66,25
60	71,06
70	78,12
80	88,14

**Tabela A.1.3 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o segundo experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	73,51
2	65,87
4,5	60,54
8	57,75
15	58,95
20	64,38
23	69,77
28	83,47
30	91,12
31,9	99,87

**Tabela A.1.4 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o terceiro experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	66,83
2	66,38
4,5	66,03
8	65,82
15	65,83
20	66,11
23	66,39
28	67,01
30	67,33
40	69,47
50	72,61
60	76,91
70	82,55
80	89,82

**Tabela A.1.5 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o quinto experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	81,64
2	79,94
4,5	79,10
8	79,67
15	84,69
20	91,39
23	96,85
24	98,94
24,5	100,00

**Tabela A.1.6 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o quarto experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	66,83
2	66,38
4,5	66,03
8	65,82
15	65,83
20	66,11
23	66,39
28	67,01
30	67,33
40	69,47
50	72,61
60	76,91
70	82,55
80	89,82

**Tabela A.1.7 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o sexto experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	83,79
2	82,00
4,5	81,14
8	81,72
15	86,56
20	92,83
23	97,83
24	99,73

**Tabela A.1.8 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o sétimo experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	89,86
2	88,81
4,5	87,91
8	87,15
15	86,21
18	85,96
19,5	85,87
30	85,72
40	86,46
50	88,13
60	90,79
70	94,56
80	99,59

**Tabela A.1.9 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o oitavo experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	93,67
2	89,81
4,5	86,94
8	85,31
15	85,52
20	87,77
23	89,94
28	94,99
30	97,56
31,5	99,71

**Tabela A.1.10 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o nono experimento de acordo com a Tabela 3.6**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
1,5	98,98
2	96,69
4,5	90,68
8	87,64
15	89,39
20	95,65
21	97,43
22	99,41
22,3	100,00

**Tabela A.1.11 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o décimo experimento de acordo com a Tabela 3.12**

$d_p(\mu\text{m})$	$G(d)(\%)$
0,7	99,74
2	94,88
4,5	91,50
8	90,07
15	92,53
20	97,85
21	99,28

**Tabela A.1.12 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o décimo primeiro experimento de acordo com a Tabela 3.12**

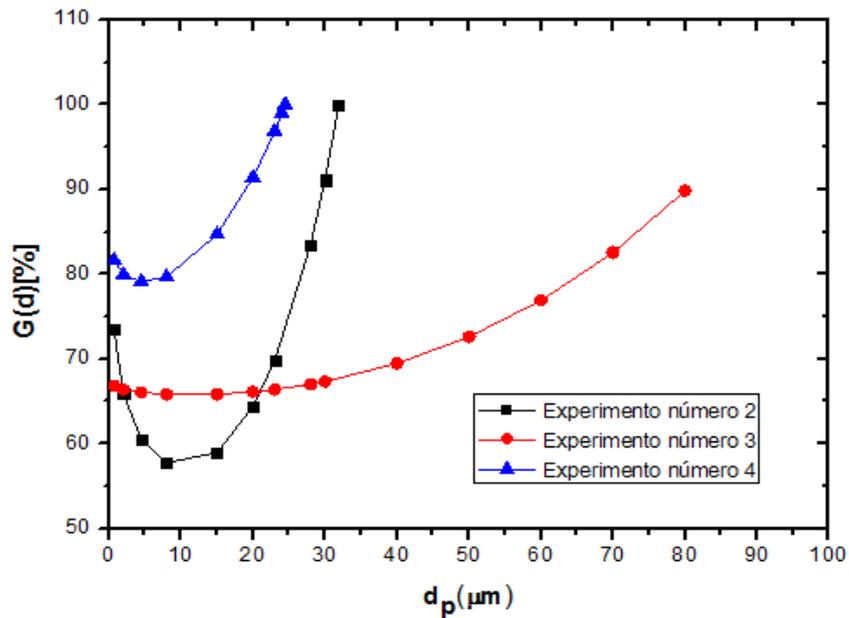
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	G(d)(%)
2	99,91
4,5	98,48
8	97,48
15	96,88
20	97,24
21	97,38
22	97,54
30	99,70
30,8	99,99

**Tabela A.1.13 – Valores de eficiência granulométrica em função do diâmetro da partícula para o décimo segundo experimento( configuração em série), de acordo com a Tabela 3.12.**

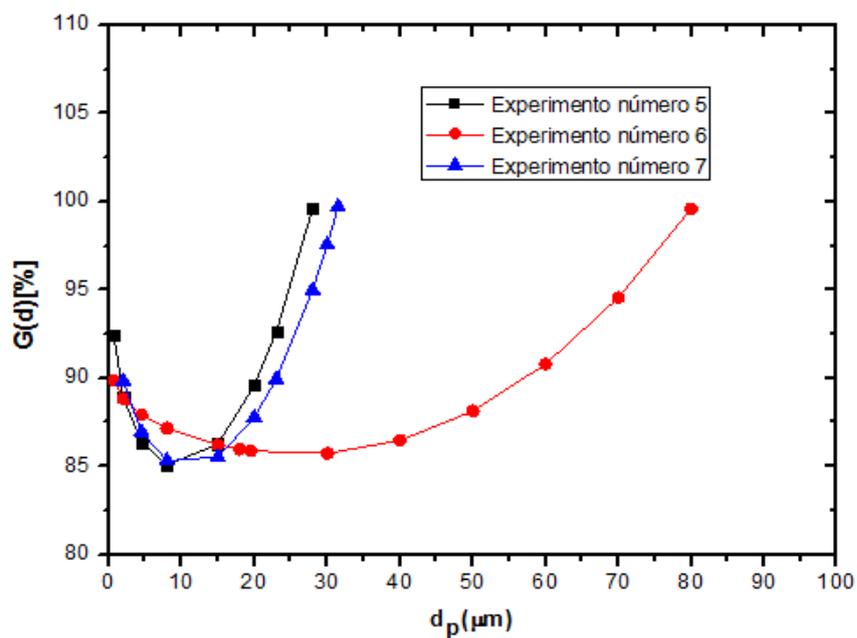
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	G(d)(%)
0,9	99,64
2	97,88
4,5	96,31
8	95,77
15	97,31
18	98,78
19,5	99,69

## APÊNDICE 2

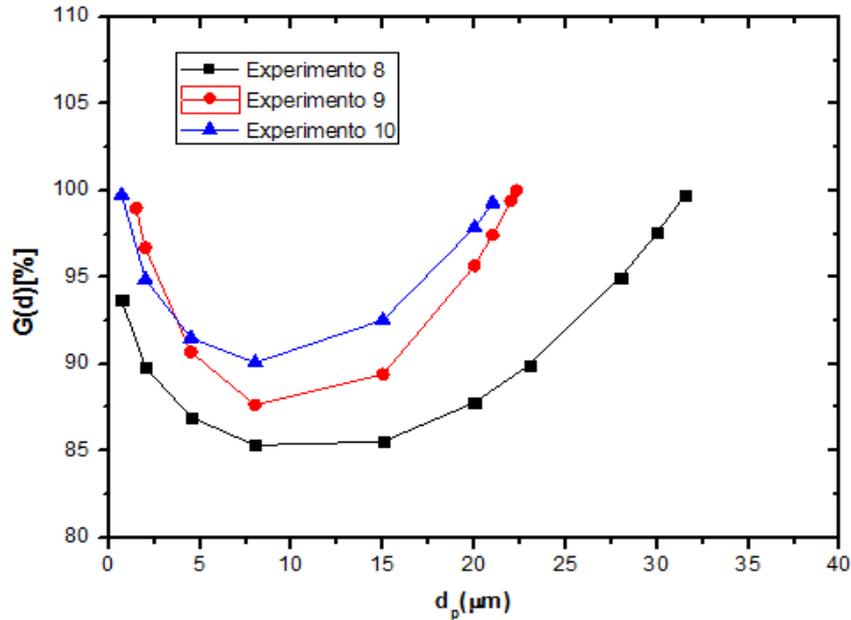
A.2.1 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 2,3 e 4 para o hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21 de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6..



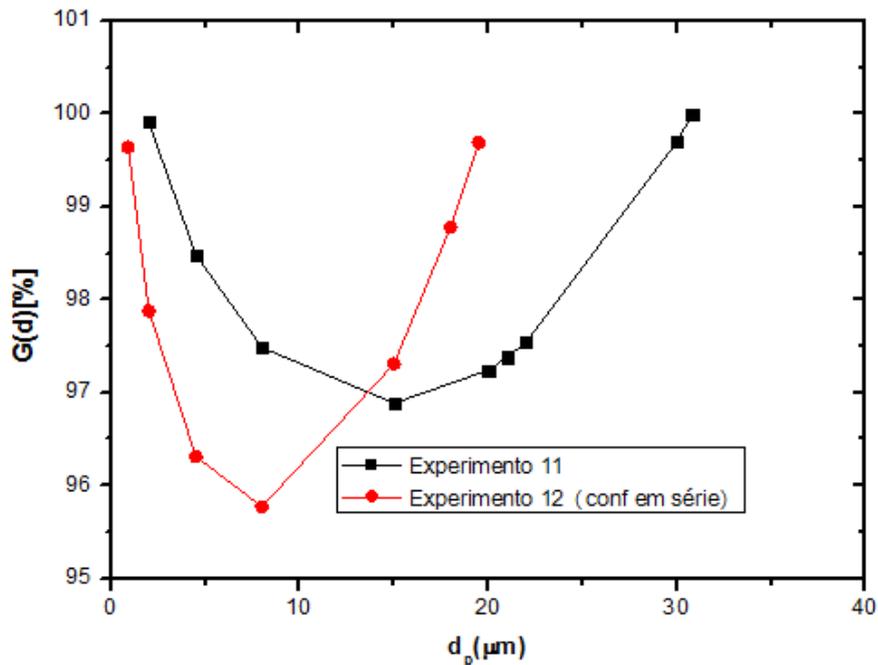
A.2.2 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 5,6 e 7 para o hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21. de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6..



A.2.3 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 8,9 e 10 para o hidrociclone AKW RWK 21 de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6.

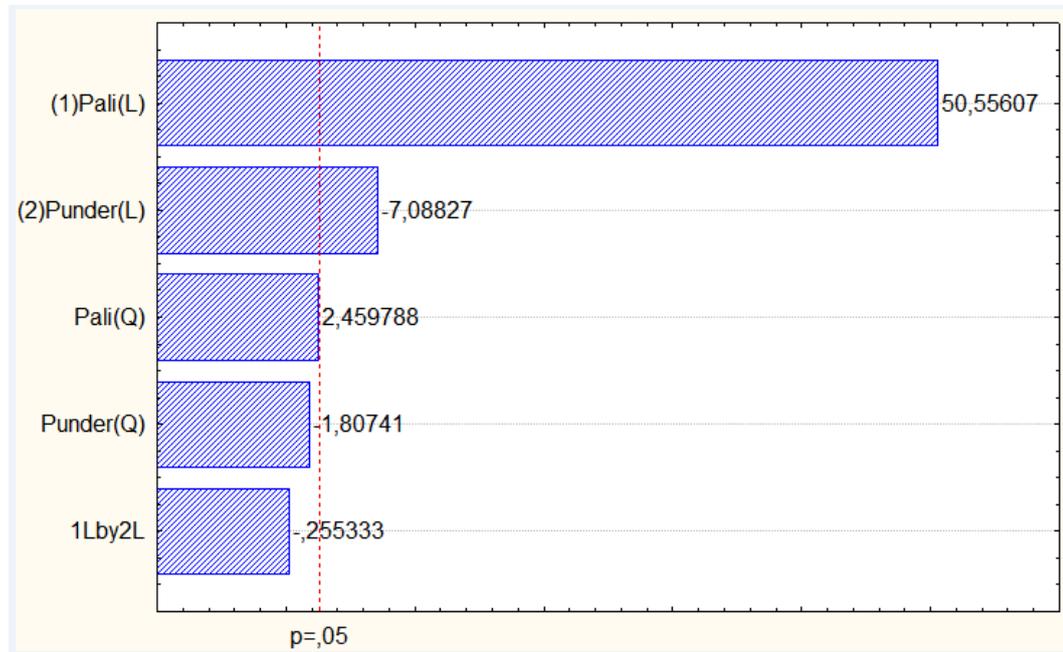


A.2.4 – Figura que mostra as curvas de eficiências granulométricas correspondente aos experimentos de número 8,9 e 10 para o hidrociclone AKW tipo RWK 21 de acordo com o planejamento de experimento proposto Tabela 3.6, e também considerando a .configuração em série.

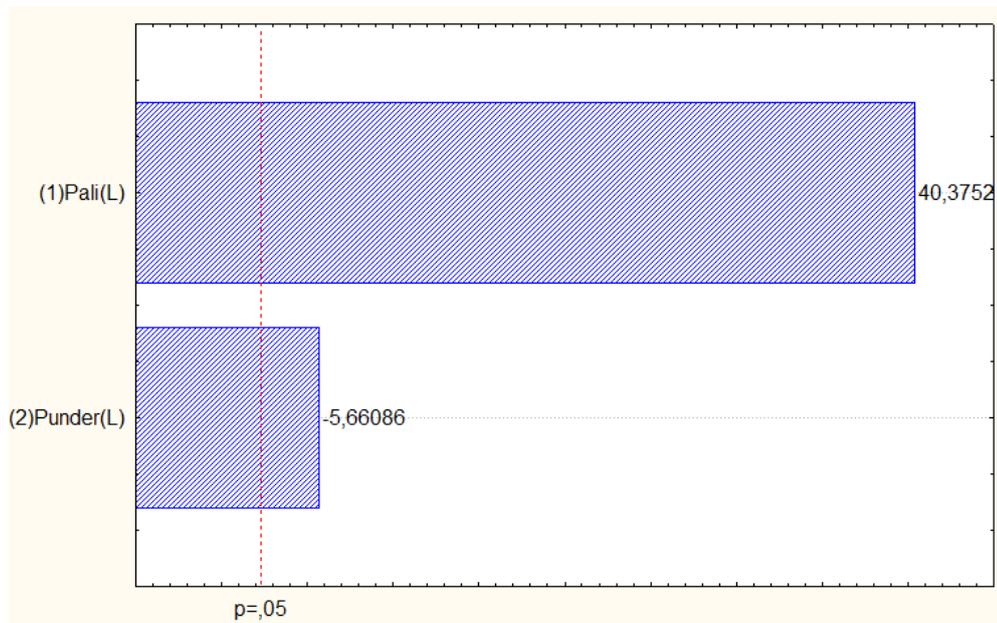


### APÊNDICE 3

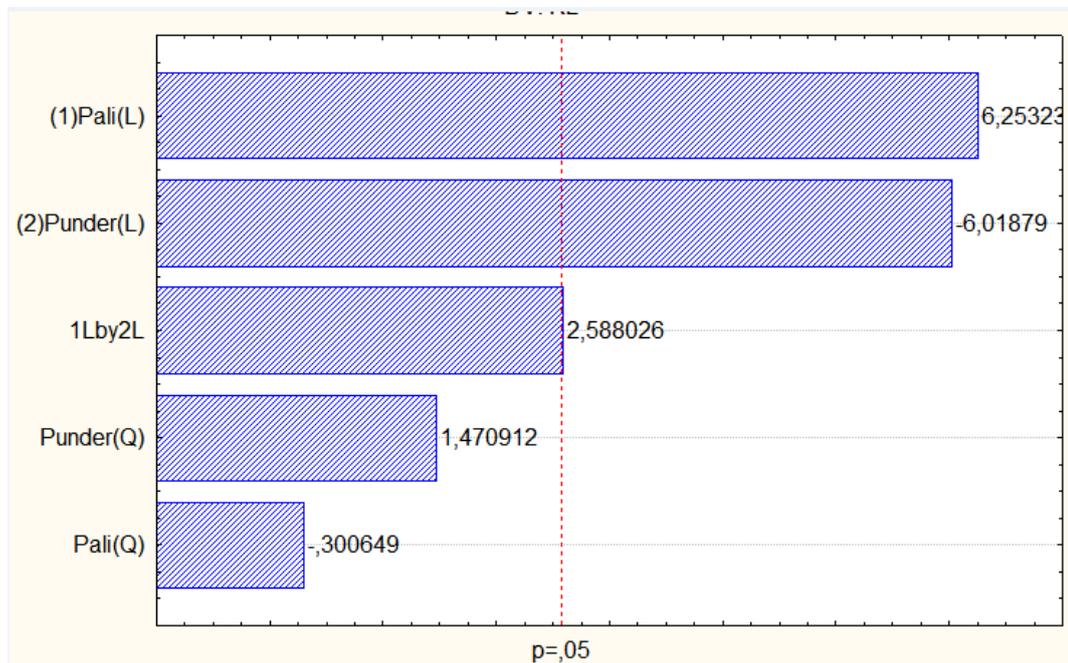
#### 3.1.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na capacidade do hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A.



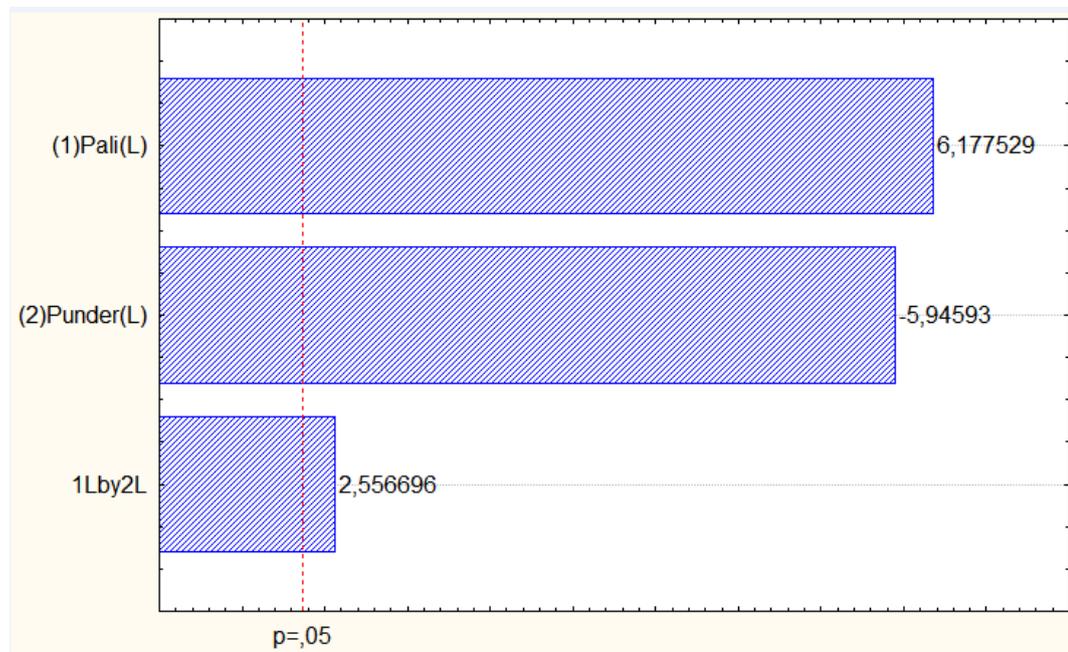
#### 3.1.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de $p = 0,05$



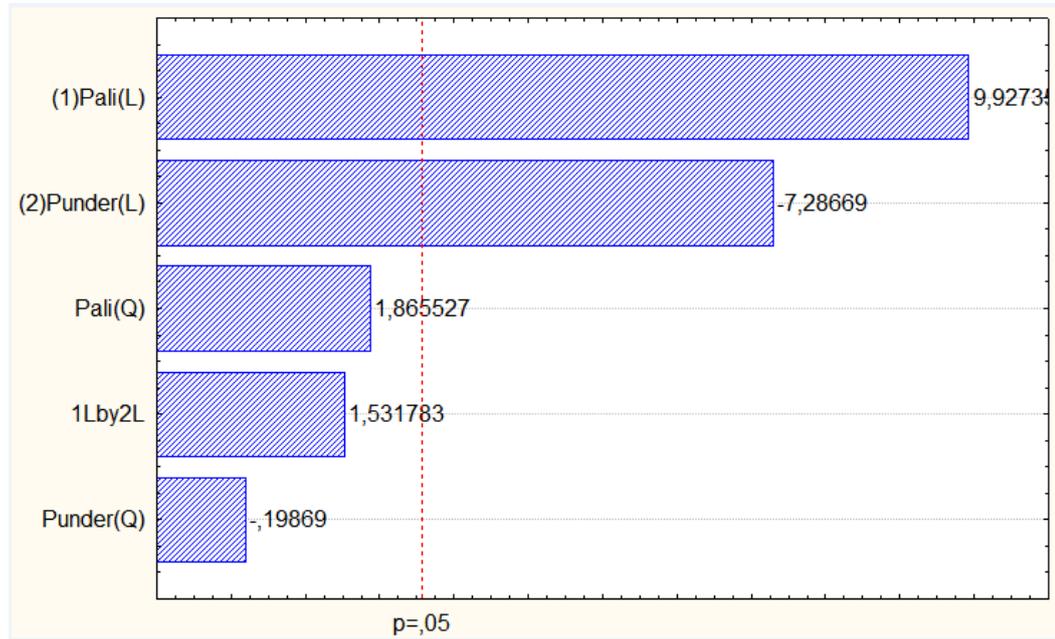
**A.3.2.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na razão de líquido do hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A.**



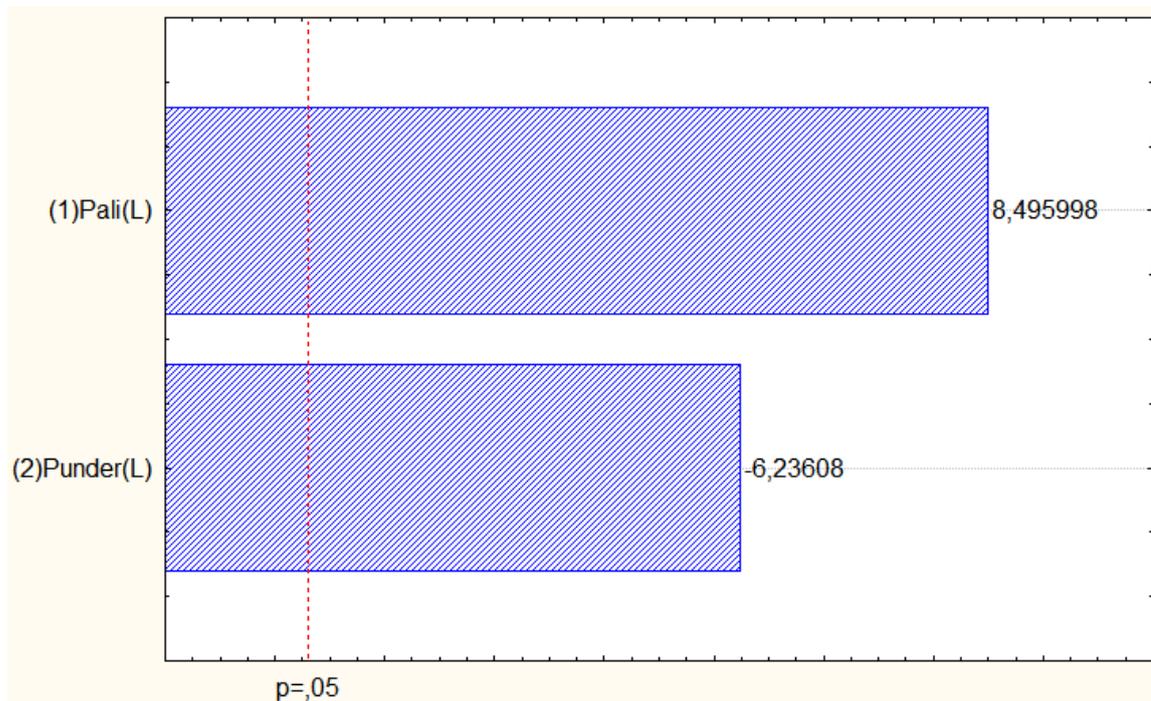
**A.3.2.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de  $p = 0,05$**



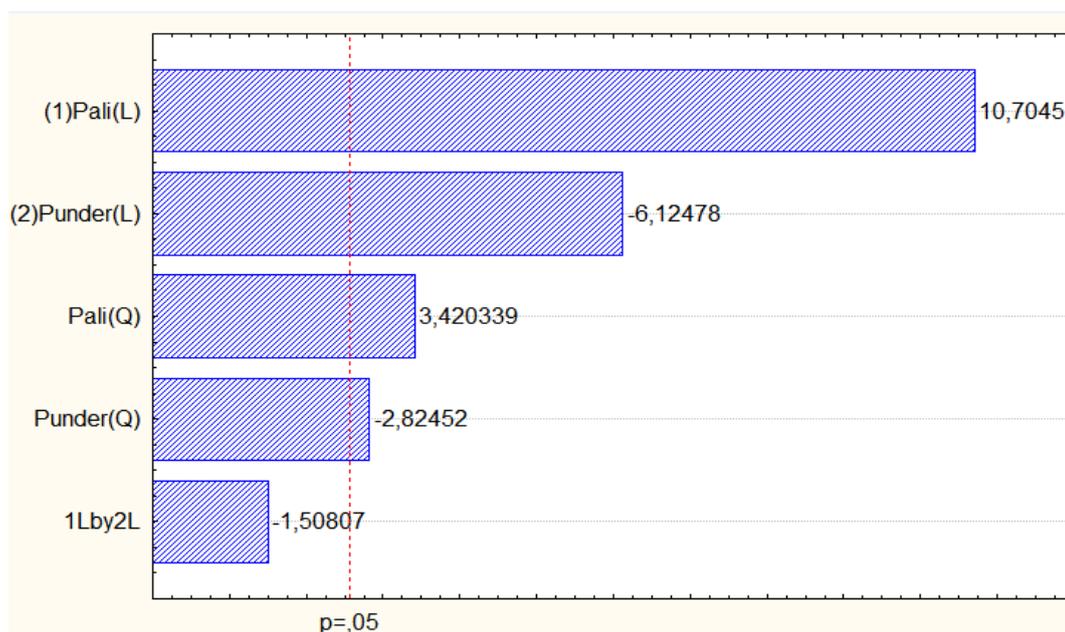
**A.3.3.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na eficiência total de separação do hidrociclone Doxie A® tipo A.**



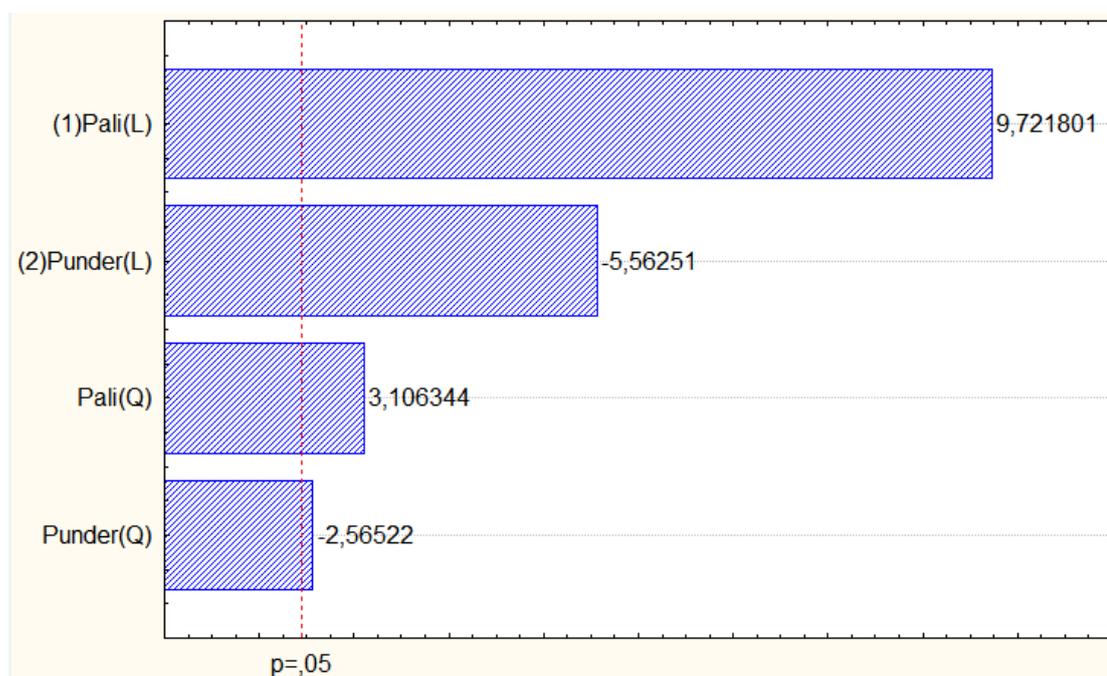
**A.3.3.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de  $p = 0,05$**



**A.3.4.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na eficiência total de separação reduzida do hidrociclone Doxie A<sup>®</sup> tipo A.**

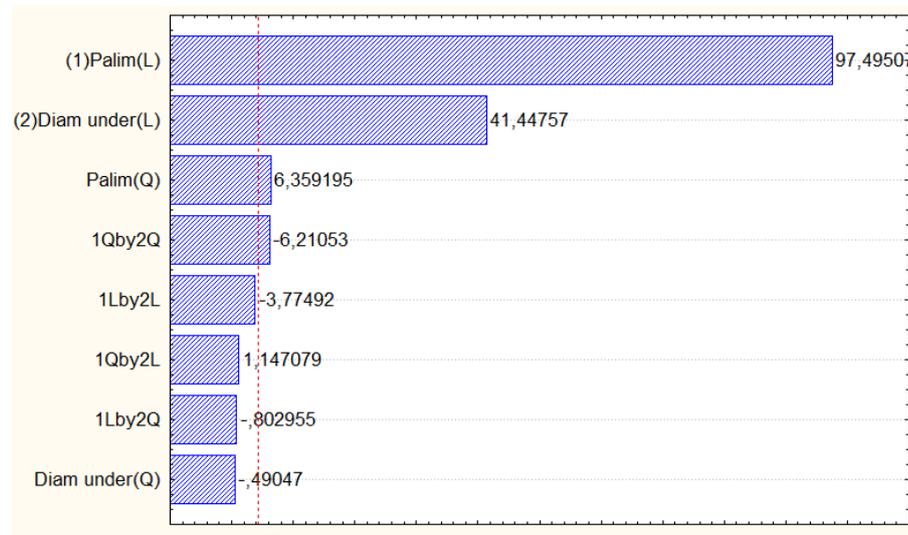


**A.3.4.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de  $p = 0,05$**

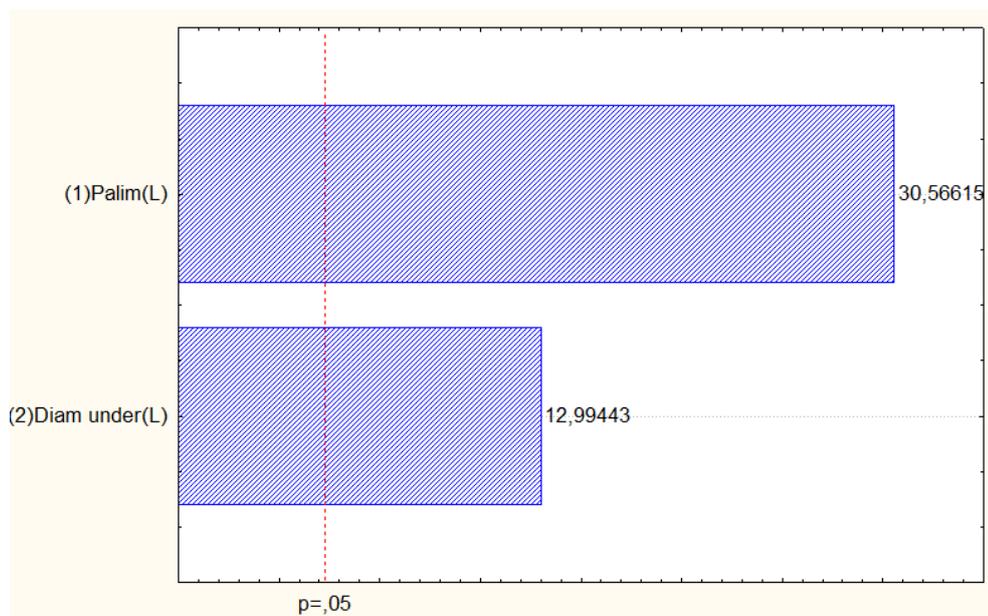


## APÊNDICE 4

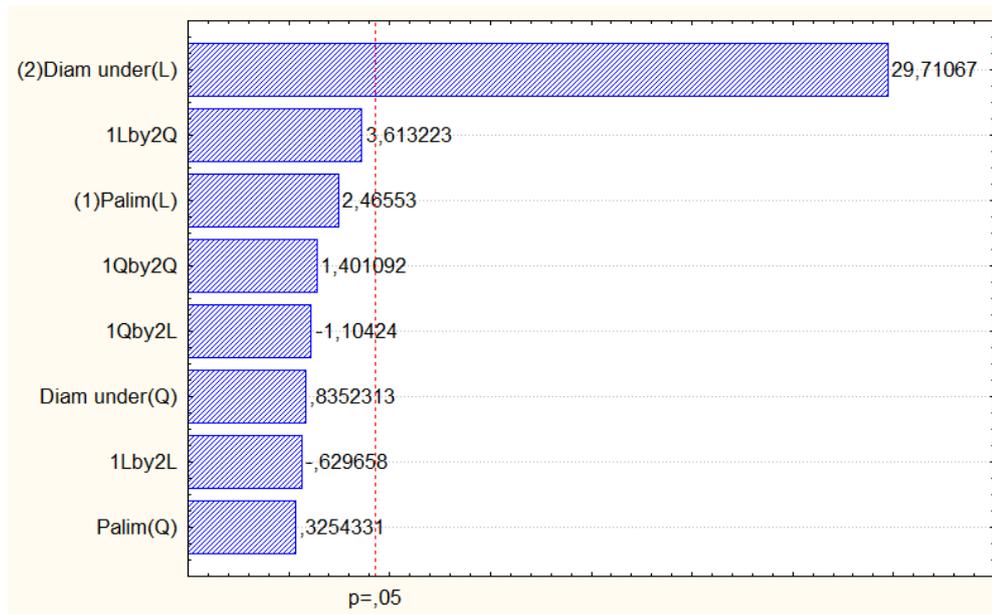
### A.4.1.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influenciam na capacidade do hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.



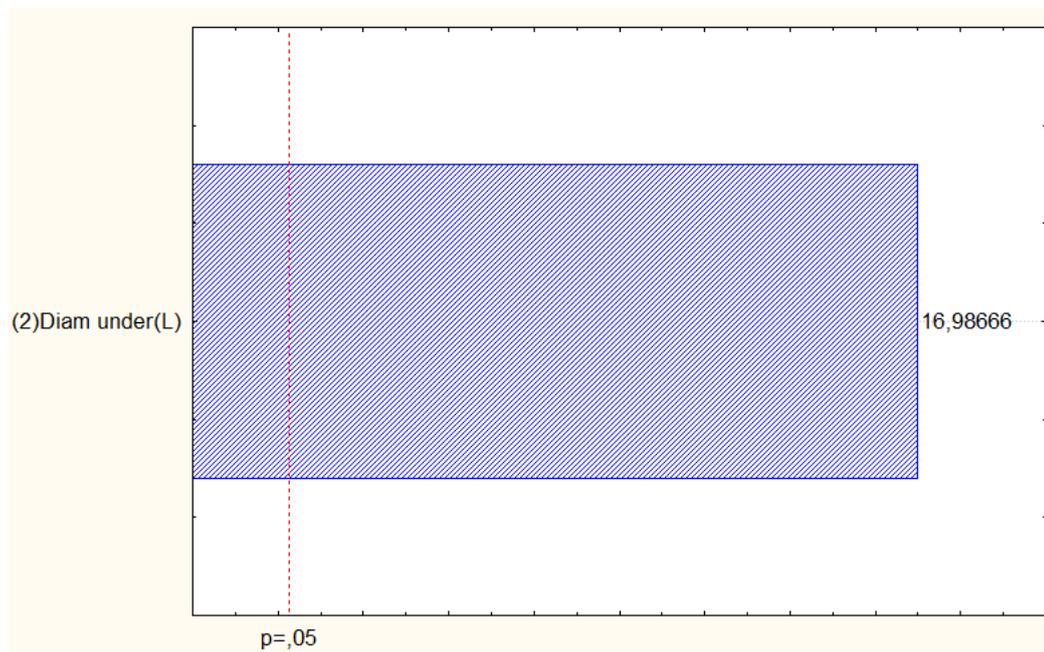
### A.4.1.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de $p = 0,05$



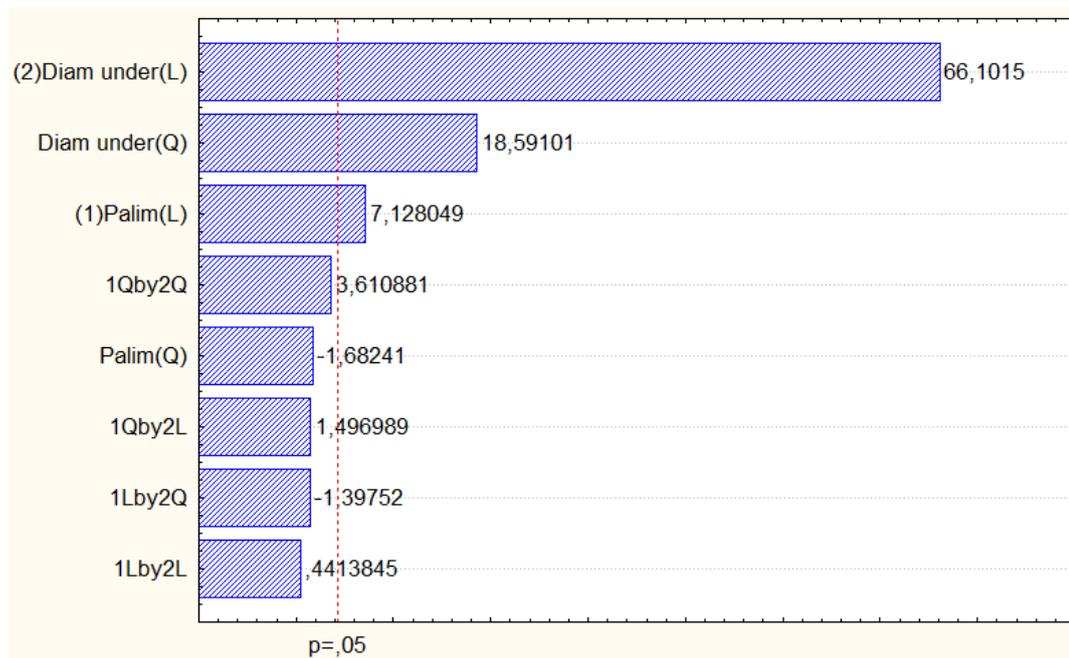
**A.4.2.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influencia na razão de líquido do hidrociclone AKW® tipo RWK 21.**



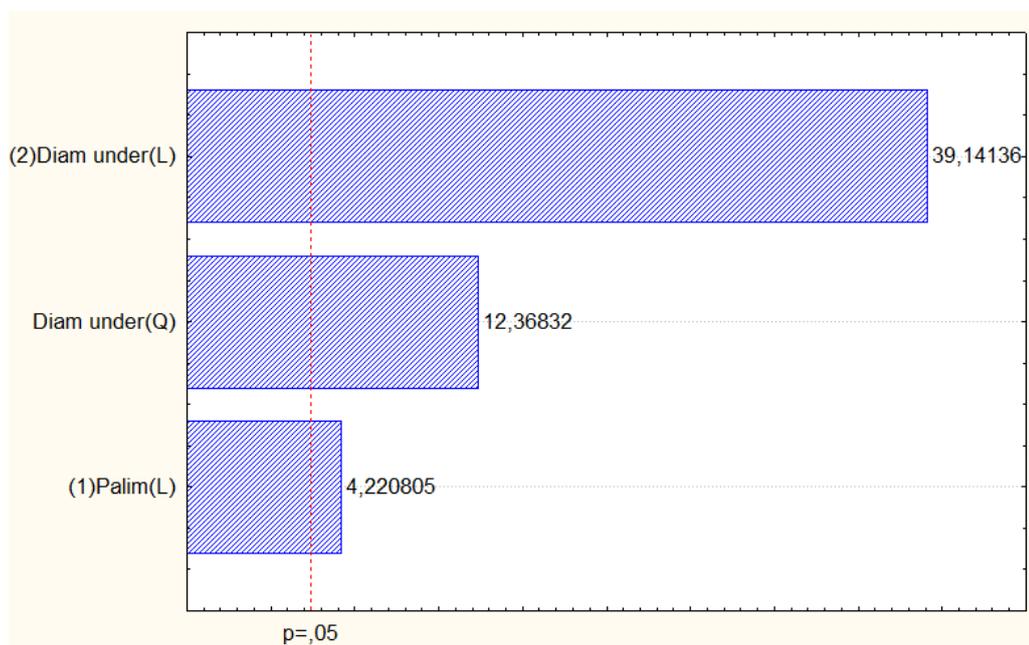
**A.4.2.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de  $p = 0,05$**



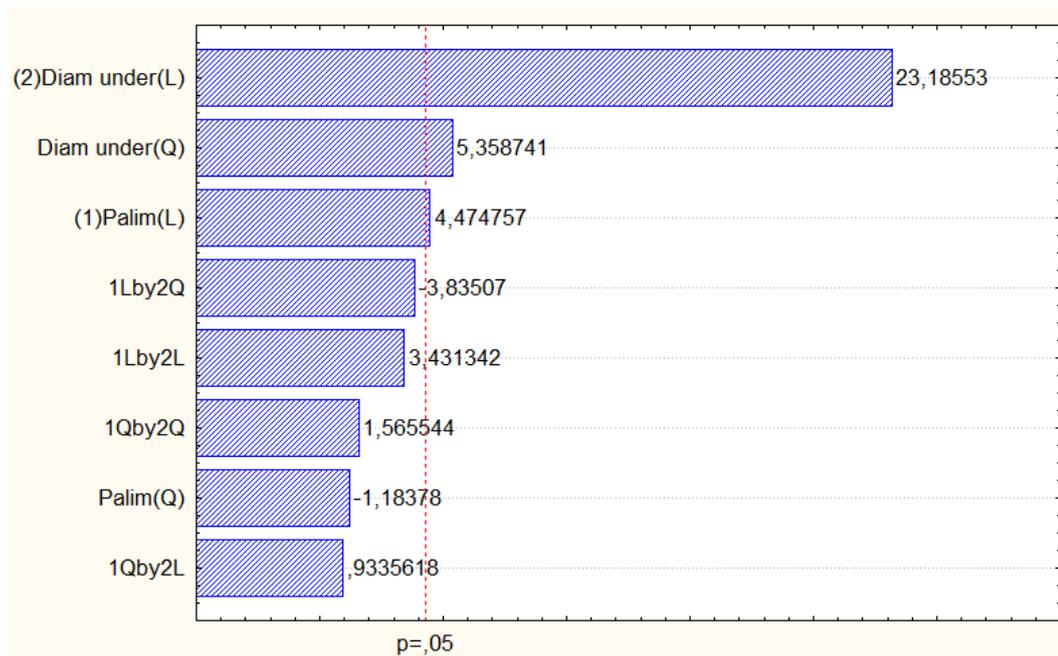
**A.4.3.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influencia na eficiência total de separação do hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.**



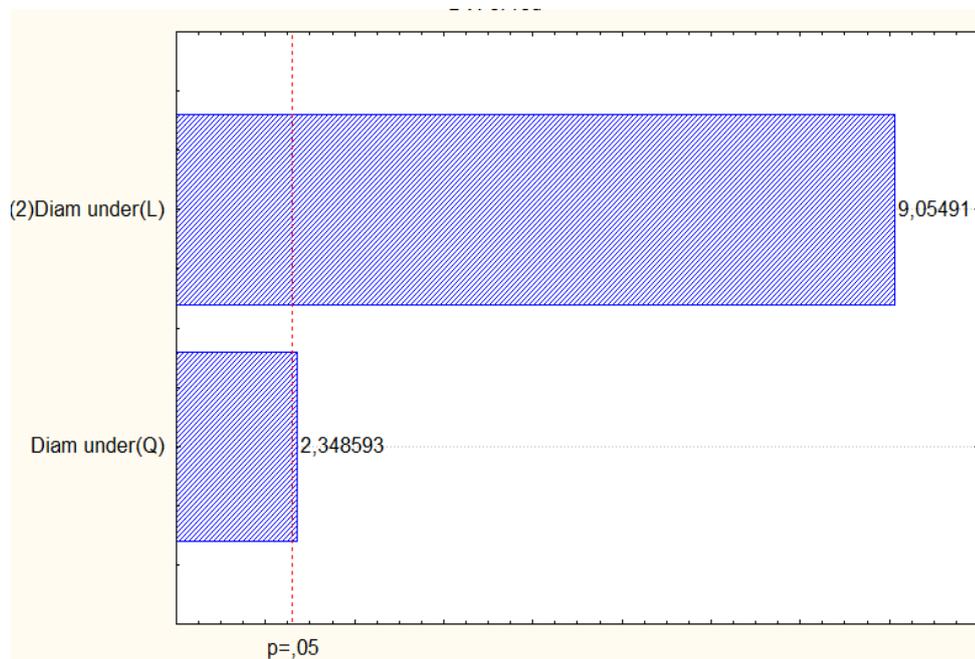
**A.4.3.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de  $p = 0,05$**



**A.4.4.1 – Gráfico de Pareto para as variáveis que a priori influencia na eficiência total reduzida de separação do hidrociclone AKW<sup>®</sup> tipo RWK 21.**

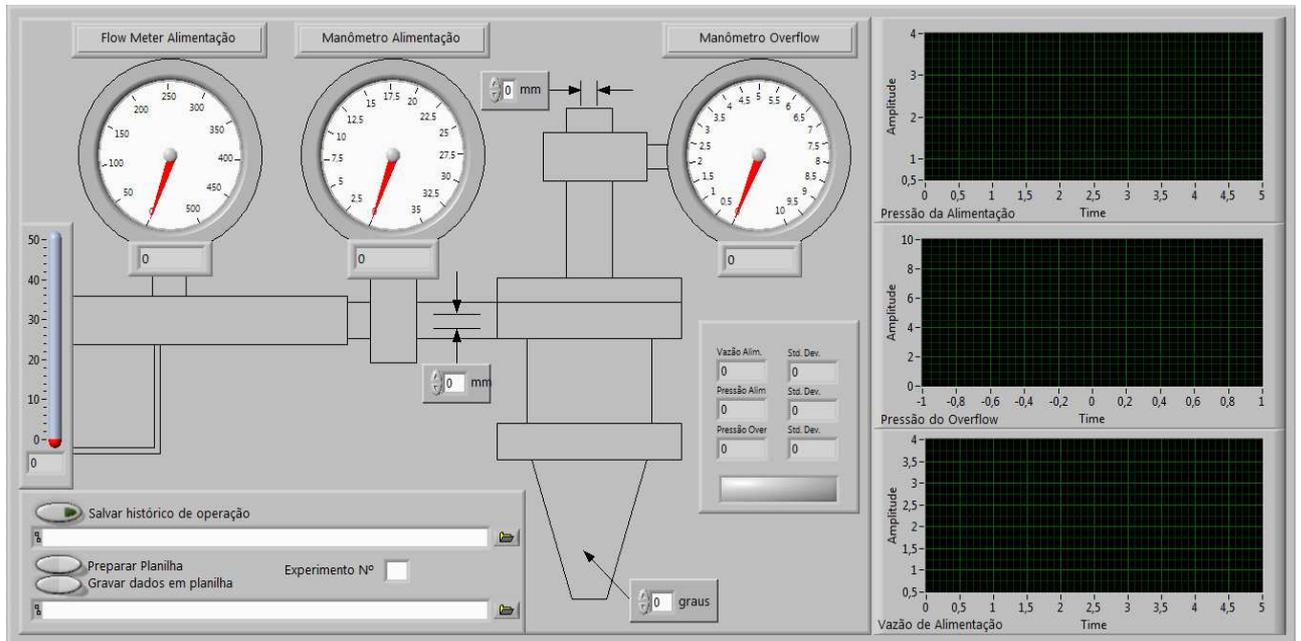


**A.4.4.2 – Gráfico de Pareto após a exclusão, uma a uma, das variáveis considerando o valor de  $p = 0,05$**



## ANEXO 1

### A.6.1 – Sistema de aquisição de dados



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C. A. K., Comportamento do Hidrociclone Filtrante Frente as Modificações no Diâmetro de *Underflow* e no Tubo de *Vortex Finder*, PPGEQ/UFU, Uberlândia - MG (dissertação de mestrado), 89p, 2008.
- ALVES, A. F., Separação de Leveduras da Fermentação Alcoólica em Hidrociclones, PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (dissertação de mestrado), 154p, 2006.
- ANDRIETTA S. R., ANDRIETTA M. G. S. Microbiologia Básica. Material para o treinamento básico de analista em microbiologia realizado no Laboratório de Processos e Biotecnologia – CPQBA– Unicamp, 2000.
- BARBOSA A. S., FLORENTINO E. R., FLORÊNCIO I. M. Utilização do soro como substrato para produção de aguardente: Estudo Cinético da Produção de Etanol, Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil) v.5, n.1, p.07-25, 2010.
- BICALHO, I. C., MOGNON, J. L., SHYMOIAMA, J., DUARTE, C. R., ATAÍDE, C. H., Effects of operation variables on the yeast separation process in hydrocyclone, Separation Science and Technology, v. 48, p. 915 – 922, 2013. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.712597>
- BICALHO, I. C., Concentração de Leveduras de Fermentação alcoólica em Hidrociclones, PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (dissertação de mestrado), 1360, 2011.
- BORGES, V. M., HENRIQUE, A., ALVES, A. F., ATAÍDE, C. H., RIBEIRO, E.J. Separação de Leveduras em Hidrociclones Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, UNICAMP-SP, 2005.
- CILLIERS, J. J., HARRISON, S. T. L., The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions. The Chemical Engineering Journal, Elsevier Science Ltda, v. 65, p. 21-26, 1997.
- NASCIMENTO, M. R. M., BICALHO, I. C.; MOGNON, J. L.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R., Performance of a New Geometry of Deoiling Hydrocyclones: Experiments and Numerical Simulation, Chemical Engineering and Technology, v.36, p. 98 – 108, 2013. <https://doi.org/10.1002/ceat.201200258>
- CASTILHO, L. R., MEDRONHO, R. A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. Minerals Engineering, Elsevier Science Ltda, v. 13, No 2, 2000, p. 183-191

- CRINER, H. E., The Vortex Thickener, I International Conference on Coal Preparation, Paris, 1950.
- DRIESSEN, M. G., Review of Industrial Mining, Special Issue, n. 4, St. Etienne, p.449-461, 1951.
- FAHLSTROM, P. H In Proc. Int. Processing Congress. 1960, p.632 – 643
- GONÇALVES, R. V., Projeto Auxilido por computador de processos industriais sustentáveis utilizando os softwares Coco e Scilab, PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (dissertação de mestrado) 94 p, 2011.
- HAWANG, K. J., LYO. I. S., NAGASE. W, Particle separation efficiency in two hydrocyclones in series, Department of Chemical and Materials Engineering, Elsevier Science Ltda, v. 40, p. 313 – 319. 2008.
- LIMA, U. A., AQUARONE. E., BORZANI. W.; SCHMIDELL. W. Biotecnologia Industrial, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, vol.3, p. 300, 2001.
- LUCARINI A. C.; SILVA L. A.; BIANCHI R. A. C. Um sistema para a contagem semi-automática de microorganismos. PESQUISA & TECNOLOGIA FEI - Nº 26 p 36-40. Disponível em <http://fei.edu.br/~rbianchi/publications/RevistaFEI2004-a.pdf> acessado em 30/01/2011.
- MATTA, V. M., MEDRONHO, R. A. New method for yeast recovery in batch ethanol fermentations: Filter aid filtration followed by separation of yeast from filter aid using hydrocyclones, Kluwer Academic Publishers: Bioseparation, v.9, p. 43-53, 2000.
- MELO, C. H., Modelagem da Classificação de Minério de Ferro em Hidrociclones, Rio de Janeiro, 2010. <https://doi.org/10.1023/A:1008145419175>
- SCHAPEL, S. C., CHASE, G. G. Modeling of Hydrocyclone Flows with Permeable Walls. Advances in Filtration and Separation Technology, Vol. 11, p. 33-36, 1998.
- PINTO, R. C. V., MEDRONHO R. A., CASTILHO L. R. Separation of CHO Cells Using Hydrocyclones. Cytotechnology 56:57–67p, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10616-007-9108-x>
- RIETEMA, K., Performance and Design of Hydrocyclone - Parts I to IV. Chemical Engineering Science, Vol. 15, p.298-325, 1961. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)85033-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)85033-1)
- SILVA, M. A. P. e MEDRONHO, R. A., Modelos que prevêm o desempenho de hidrociclones: uma avaliação crítica, XVI Encontro Nacional sobre Escoamentos em Meios Porosos, Petrópolis, p.353-361, 1988.
- SVAROVSKY, L. Hydrocyclones. Technomic Publishing Co., Inc., 1984.
- SVAROVSKY, L., Solid-Liquid Separation, 4rd Edn. Butterworths, London, 2000.

- TEIXEIRA, J. A ., OLIVIRA, R., AZEREDO, J., SOUSA, M., SIL, C., Cell wall surfasse properties and flocculence of a *Kluyveromyces marxianus* strain, Centro de Engenharia, Elsevier Science Ltda, *Biológica* V. 5, p. 197 – 203 1995.
- UDOP – União dos Produtores de Bioenergia disponível em <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1072977>
- SILVA, M. A. P. e MEDRONHO, R. A., Modelos que prevêm o desempenho de hidrociclones: uma avaliação crítica, XVI Encontro Nacional sobre Escoamentos em Meios Porosos, Petrópolis, p.353-361, 1988.
- SOARES, E. V., Flocculation *Scchacaromyces cerevisiae*, journal of applied microbiology, 2010.
- VIEIRA, L. G. M., Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes, PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (tese de doutorado), 297p, 2006.
- WATANABE, A.L. Suplementação de levedura desidratada (*Saccharomyces cerevisiae*) e derivados na alimentação de juvenis de pacu (*Piaractus mesopotamicus*). Pirassununga, SP: USP, 2006, 82p. (Mestrado em Zootecnia). Universidade Estadual de São Paulo, Pirassununga, 2006.