

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**SEPARAÇÃO DE LEVEDURAS DE
FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA EM
HIDROCICLONES**

ARETUSA DE FÁTIMA ALVES

Uberlândia – MG

Fevereiro 2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SEPARAÇÃO DE LEVEDURAS DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA EM HIDROCICLONES

Aretusa de Fátima Alves

**Dissertação de Mestrado apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Química, área de
concentração Desenvolvimento de Processos
Químicos.**

Uberlândia – MG

Fevereiro 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

A474s Alves, Aretusa de Fátima, 1977-
 Separação de leveduras de fermentação alcoólica em
 hidrociclones

 Aretusa de Fátima Alves. - Uberlândia, 2006.

 154f. : il.
 Orientador: Carlos Henrique Ataíde.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
 Progra-
 ma de Pós-Graduação em Engenharia Química.
 Inclui bibliografia.
 1. Engenharia química - Teses. 2. Hidrociclone - Teses. 3. Sepa
 (Tecnologia) - Teses. I. Ataíde, Carlos Henrique. II. Universidad
 ral de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Qu
 III. Título.

CDU: 66.0

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ARETUSA DE FÁTIMA ALVES APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA, EM 21 DE FEVEREIRO DE 2006.

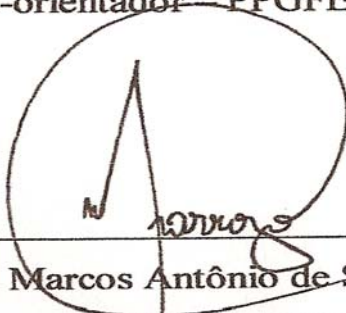
BANCA EXAMINADORA:



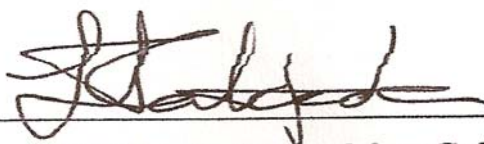
Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(Orientador – PPGFEQ/UFU)



Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro
(Co-orientador – PPGFEQ/UFU)



Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barroso
(PPGFEQ/UFU)



Prof. Dr. Luís Américo Calçada
(PPGEQ/UFRRJ)

Dedico este trabalho a todas as pessoas que estiveram ao meu lado, me apoiando e incentivando, em especial à minha mãe pelo incansável incentivo e ao meu pai que pegou em minha mão e me ensinou a rabiscar as primeiras letras, onde tudo começou.

AGRADECIMENTOS

À Deus que guiou meus passos para a conquista de mais esta etapa em meu caminho.

Ao CNPQ por ter viabilizado os recursos necessários ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Carlos Henrique Ataíde pela dedicação, incentivo, paciência e amizade durante a realização deste trabalho. Também ao meu co-orientador Prof. Eloízio Júlio Ribeiro pelas dicas e sugestões, principalmente na reta final deste trabalho. Ao Prof. Marcos Barrozo pela contribuição e sugestões.

Aos alunos de iniciação científica Viviane Borges e Aenderson Eduardo pelo auxílio e por tornarem mais alegres as horas destinadas à realização dos ensaios experimentais.

Aos funcionários da FEQ/ UFU, Roberta Alves Andrade e Silvino Joaquim Corrêa, que muito me ajudaram no decorrer deste curso.

Ao Renato Campos pela ajuda, carinho e compreensão nos momentos em que não pude estar ao seu lado.

Ao meu irmão Alisson Alves pela contribuição e à minha querida sobrinha Laura Alves por me proporcionar tantas horas de lazer pueril.

À minha mãe Aparecida Alves a quem amo muito e por estar sempre ao meu lado como um anjo, me aconselhando nas horas de dúvidas, me apoiando nos momentos difíceis e compartilhando os meus momentos de alegria.

À minha avó Silvia Pereira e ao meu pai Renato Alves pelos quais as saudades que sinto só não é maior do que o amor que me dedicaram em vida.

“Não mostre a Deus o tamanho dos seus problemas, mostre aos seus problemas o tamanho de Deus.”

(Autor desconhecido)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.	i
LISTA DE TABELAS.	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.	xiv
RESUMO.	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	 01
 CAPÍTULO 2 – REVISAO BIBLIOGRÁFICA	 06
2.1. – INTRODUÇÃO.....	06
2.2. – CENTRÍFUGAS.....	07
2.2.1. – O CONCEITO SIGMA.....	09
2.3 – HIDROCICLONES.....	11
2.3.1 – “FAMÍLIAS” DE HIDROCICLONES.....	11
2.4 – FORMULAÇÃO.....	13
2.4.1 – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO.....	13
2.4.1.1 – EFICIÊNCIA TOTAL OU GLOBAL (E_T).....	14
2.4.1.2 – EFICIÊNCIA TOTAL REDUZIDA (E'_T).....	14
2.4.1.3 – EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA [$G(d)$].....	15
2.4.1.4 – EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA REDUZIDA [$G'(d)$].....	15
2.4.2 – GRUPOS ADIMENSIONAIS RELEVANTES.....	16
2.4.3 – TEORIAS DE SEPARAÇÃO EM HIDROCICLONES.....	18
2.4.3.1 – TEORIA DA ÓRBITA DE EQUILÍBRIO.....	19
2.4.3.2 – TEORIA DO TEMPO DE RESIDÊNCIA.....	21
2.4.3.3 – TEORIA POPULACIONAL.....	23
2.4.3.4 – TEORIA DO ESCOAMENTO TURBILHONAR BIFÁSICO.....	23
2.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PARTICULADO.....	23
2.6 – USO DE HIDROCICLONES PARA SEPARAÇÃO DE MICRORGANISMOS	
PROVENIENTES DA FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA.....	24
2.6.1 – AGENTE DE FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA.....	25
2.6.2 – ANALISE DE VIABILIDADE DO AGENTE DE FERMENTAÇÃO.....	27

2.7 – TRABALHOS REPORTADOS NA LITERATURA SOBRE O USO DE HIDROCICLONES NA SEPARAÇÃO DE MICRORGANISMOS.....	27
2.8 – O EFEITO <i>FISH HOOK</i>	33
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 – OS HIDROCICLONES UTILIZADOS.	35
3.2 – UNIDADE EXPERIMENTAL.	37
3.3 – MATERIAL PARTICULADO UTILIZADO.....	39
3.4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	39
3.4.1 – PREPARO DA SOLUÇÃO.....	39
3.4.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	39
3.4.2.1 – CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO MÁSSICA.....	41
3.4.2.2 – DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	42
3.4.2.3 – DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE CELULAR.....	43
3.4.3 – PREPARO DO MOSTO FERMENTADO.....	44
3.4.4 – PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DO DIÂMETRO DE CORTE.....	46
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO.....	47
4.2 – RESULTADOS HIDROCICLONES INDIVIDUAIS.....	48
4.2.1 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TOTAL.....	48
4.2.2 – INFLUÊNCIA DO HIDROCICLONE NA VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO.....	52
4.2.3 – CÁLCULO DO DIÂMETRO DE CORTE.....	54
4.2.4 – CÁLCULO DO DIÂMETRO DA EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA.....	57
4.2.5 – TESTE DE REPRODUTIBILIDADE DOS RESULTADOS.....	62
4.3 – RESULTADOS HIDROCICLONES EM SÉRIE.....	63
4.4 – RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	66
4.5 – ANÁLISE DA VIABILIDADE CELULAR.....	70
4.6 – ANÁLISE DO MOSTO FERMENTADO.....	72
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	78
5.1 – CONCLUSÕES.....	78
5.1.1 – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO.....	78

5.1.2 – DIÂMETRO DE CORTE.	79
5.1.3 – CURVA DE EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA	79
5.1.4 – HIDROCICLONES EM SÉRIE.	79
5.1.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO <i>UNDERFLOW</i>	80
5.1.6 – VIABILIDADE CELULAR	80
5.1.7 – GERAL.	80
5.2 – SUGESTÕES.	81
ANEXOS.	83
ANEXO 1.	83
A1.1 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE AKW A 2 ATM.	84
A1.2 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE AKW A 4 ATM.	89
A1.3 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE AKW A 6 ATM.	94
A1.4 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 10\text{MM}$ A 2 ATM.	99
A1.5 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 10\text{MM}$ A 4 ATM.	103
A1.6 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 10\text{MM}$ A 6 ATM.	107
A1.7 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 20\text{MM}$ A 2 ATM.	111
A1.8 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 20\text{MM}$ A 4 ATM.	116
A1.9 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 20\text{MM}$ A 6 ATM.	121
A1.10 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE BRADLEY $D_C = 30\text{MM}$ A 2 ATM.	125
A1.11 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE KREBS A 2 ATM.	130
A1.12 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE KREBS A 4 ATM.	135

A1.13 – RESULTADOS OBTIDOS NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS PARA O HIDROCICLONE KREBS A 6 ATM.	140
ANEXO 2	145
A2.1 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TOTAL E DO DIÂMETRO DE CORTE PARA O HIDROCICLONE AKW (MAPLE® 8).	146
A2.2 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA E GRANULOMÉTRICA REDUZIDA PARA O HIDROCICLONE AKW (MAPLE® 8).	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um típico hidrociclone.	03
Figura 1.2 – Trajetória da suspensão no interior do hidrociclone.	04
Figura 2.1– Centrífuga de discos com descarga por bocais.	08
Figura 2.2– Esquema da centrífuga tubular.....	08
Figura 2.3 – local de velocidade vertical zero (LZVV).....	20
Figura 2.4 – Órbita de Equilíbrio.	20
Figura 2.5 – Diagrama simplificado dos fluxos radial e axial de um hidrociclone.	21
Figura 2.6 – a)Vista superior da posição de entrada de partículas na posição menos favorável,b) vista superior da posição de coleta d_{50} (posição $D_i/2$).	22
Figura 2.7 – Fluxograma simplificado da fermentação alcoólica. a) Uso da centrífuga separação de leveduras do mosto fermentado, b) Uso de hidrociclone na separação de leveduras do mosto fermentado.	26
Figura 2.8 – Curva de eficiência granulométrica, granulométrica reduzida e <i>fish hook</i>	34
Figura 3.1 – Hidrociclones Bradley com $D_c = 10, 20$ e 30 mm, respectivamente.	35
Figura 3.2 – Hidrociclone AKW com $D_c = 10$ mm.	36
Figura 3.3 – Hidrociclone Krebs com $D_c = \frac{1}{2}$ in.	36
Figura 3.4 – Unidade experimental.	37
Figura 3.5 – Esquema tanque de alimentação com chicanas.....	38
Figura 3.6 – Palhetas do agitador mecânico utilizado.	38
Figura 3.7 – Procedimento esquemático para a simulação da operação de hidrociclones em série.....	41
Figura 3.8 – Esquema simplificado da câmara de Neubauer.	44
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica típica da levedura.	48
Figura 4.2 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência total.	50
Figura 4.3 – Influência da queda de pressão e do D_c na eficiência total.	50
Figura 4.4 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência total reduzida.	51
Figura 4.5 – Influência da queda de pressão e do D_c na eficiência total reduzida.	51
Figura 4.6 – Influência do tipo do hidrociclone na capacidade.....	52
Figura 4.7 – Influência do D_c na capacidade do hidrociclone.	53
Figura 4.8 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone no diâmetro de corte.	56

Figura 4.9 – Influência da queda de pressão e do D_c no diâmetro de corte.....	56
Figura 4.10 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone no diâmetro de corte reduzido.	57
Figura 4.11 – Influência da queda de pressão e do D_c no diâmetro de corte reduzido.....	57
Figura 4.12 – Influência do tipo do hidrociclone da queda de pressão na eficiência granulométrica.	58
Figura 4.13 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica AKW.	59
Figura 4.14 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica Bradley $D_c=10\text{mm}$	59
Figura 4.15 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica Bradley, $D_c=20$ e 30 mm	60
Figura 4.16 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica Krebs.	60
Figura 4.17 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida AKW.....	61
Figura 4.18 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida Bradley $D_c=10\text{mm}$	61
Figura 4.19 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida Bradley $D_c=20$ e 30 mm	62
Figura 4.20 – Influência da queda de pressão na eficiência granulométrica reduzida Krebs.....	62
Figura 4.21 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na eficiência total para hidrociclones em série.	65
Figura 4.22 – Influência da queda de pressão e do D_c na eficiência total para hidrociclones em série.....	65
Figura 4.23 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para o hidrociclone AKW individual..	66
Figura 4.24 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para o hidrociclone AKW em série.....	67
Figura 4.25 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley individual com $D_c= 10\text{mm}$	67
Figura 4.26 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley em série com $D_c= 10\text{mm}$	68
Figura 4.27 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para os hidrociclones Bradley individuais com $D_c= 20$ e 30mm	68
Figura 4.28 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para os hidrociclones Bradley em série com $D_c= 20$ e 30mm	69
Figura 4.29 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para o hidrociclone Krebs individual..	69
Figura 4.30 – Distribuição granulométrica do <i>underflow</i> para o hidrociclone Krebs em série.....	70

Figura 4.31 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na viabilidade celular para hidrociclones individuais.	71
Figura 4.32 – Influência da queda de pressão e do tipo do hidrociclone na viabilidade celular para hidrociclones em série.....	71
Figura 4.33 – Distribuição granulométrica típica para o mosto fermentado.	72
Figura 4.34 – Perfil do consumo de açúcar presentes no mosto fermentado em função do tempo de fermentação.	73
Figura 4.35 –Eficiência total e total reduzida na separação do mosto fermentado e do fermento para o hidrociclone AKW.....	74
Figura 4.36 –Valores do diâmetro de corte diâmetro de corte reduzido na separação do mosto fermentado e do fermento para o hidrociclone AKW.....	74
Figura 4.37 – Curva de eficiência granulométrica para o mosto fermento e o fermento puro.....	75
Figura 4.38 – Curva de eficiência granulométrica reduzida para o mosto fermento e o fermento puro.....	75
Figura 4.39 – Influência do meio na distribuição granulométrica para o hidrociclone AKW.	76
Figura 4.40 – Influência do meio na viabilidade celular.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais tipos de centrífugas.	09
Tabela 2.2 – Relações geométricas entre dimensões dos hidrociclones (SVAROVSKY, 1984)	12
Tabela 2.3 – Parâmetros das equações (2.22), (2.23) e (2.24), (CASTILHO; MEDRONHO, 2000).	18
Tabela 2.4 – Modelos estatísticos de distribuição granulométrica de partículas.	24
Tabela 2.5 – Comparação entre resultados encontrados na literatura (MEDRONHO <i>et al</i> a, 2005).	33
Tabela 3.1 – Dimensões dos hidrociclones estudados.....	36
Tabela 3.2 – Meio de cultivo utilizado no preparo do mosto fermentado.....	45
Tabela 4.1 – Resultados de eficiência total para os hidrociclones e quedas de pressão estudadas.	49
Tabela 4.2 – Resultados de diâmetro de corte para os hidrociclones e quedas de pressão estudadas.	54
Tabela 4.3 – Valores dos adimensionais para os hidrociclones e quedas de pressão estudadas.	55
Tabela 4.4 – Razão de líquido do ensaio e da réplica.....	63
Tabela 4.5 – Eficiência total e diâmetro de corte para AKW em série.	64
Tabela 4.6 – Eficiência total e diâmetro de corte reduzido para Bradley em série.	64
Tabela 4.7 – Eficiência total e diâmetro de corte reduzido para Krebs em série.	64
Tabela 4.8 – Resultados de separação do mosto fermentado e da suspensão de fermento puro para o hidrociclone AKW a 4 atm.	73
Tabela 4.9 – Valores dos adimensionais para o hidrociclone AKW a 4 atm na separação do mosto fermentado e a suspensão de fermento puro a 3% em massa.	73
Tabela 5.1 – Dados de eficiência e capacidade para os hidrociclones estudados a 6 atm.....	81
Tabela A.1 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e <i>underflow</i> , AKW individual $\Delta P : 2 \pm 0,20$ atm	84
Tabela A.2 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20$ atm	85
Tabela A.3 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20$ atm	85

Tabela A.4 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20$ atm .	85
Tabela A.5 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20$ atm .	86
Tabela A.6 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20$ atm .	86
Tabela A.7 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> AKW em série $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm .	87
Tabela A.8 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW em série $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm ..	87
Tabela A.9 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW em série $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm .	88
Tabela A.10 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone AKW em série $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm .	88
Tabela A.11 – Eficiência total para o hidrociclone AKW em série $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm .	88
Tabela A.12 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> , AKW individual $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	89
Tabela A.13 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	90
Tabela A.14 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	90
Tabela A.15 - Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	90
Tabela A.16 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	91
Tabela A.17 – Eficiência granulométrica corte para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	91
Tabela A.18 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> AKW em série $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	92
Tabela A.19 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones AKW em série a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	92
Tabela A.20 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones AKW em série a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm .	93

Tabela A.21 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones AKW em série a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm	93
Tabela A.22 – Eficiência total para hidrociclones AKW em série a $\Delta P : 4 \pm 0,10$ atm	93
Tabela A.23 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> AKW [®] individual $\Delta P : 6 \pm 0,05$ atm	94
Tabela A.24 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 6 \pm 0,05$ atm	95
Tabela A.25 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 6 \pm 0,05$ atm	95
Tabela A.26 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 6 \pm 0,05$ atm	95
Tabela A.27 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 6 \pm 0,05$ atm	96
Tabela A.28 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone AKW individual a $\Delta P : 6 \pm 0,05$ atm	96
Tabela A.29 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> AKW em série a $\Delta P : 6 \pm 0,10$ atm	97
Tabela A.30 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones AKW em série $\Delta P : 6 \pm 0,10$ atm ..	97
Tabela A.31 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones AKW em série $\Delta P : 6 \pm 0,10$ atm	98
Tabela A.32 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones AKW em série $\Delta P : 6 \pm 0,10$ atm	98
Tabela A.33 – Eficiência total para hidrociclones AKW em série $\Delta P : 6 \pm 0,10$ atm	98
Tabela A.34 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e <i>underflow</i> , Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm	99
Tabela A.35 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm	99
Tabela A.36 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm	100
Tabela A.37 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10$ atm	100

Tabela A.38 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	100
Tabela A.39 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	100
Tabela A.40 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	101
Tabela A.41 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	101
Tabela A.42 – Cálculo da concentração mássica para o Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	102
Tabela A.43 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	102
Tabela A.44 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	102
Tabela A.45 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> , Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	103
Tabela A.46 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	103
Tabela A.47 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	104
Tabela A.48 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	104
Tabela A.49 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	104
Tabela A.50 – Eficiência granulométrica corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	104
Tabela A.51 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	105
Tabela A.52 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	105
Tabela A.53 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	106

Tabela A.54 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	106
Tabela A.55 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	106
Tabela A.56 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	107
Tabela A.57 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	107
Tabela A.58 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	108
Tabela A.59 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	108
Tabela A.60 – Eficiência total e diâmetro de corte para o Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	108
Tabela A.61 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Bradley $D_c = 10\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	108
Tabela A.62 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	109
Tabela A.63 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	109
Tabela A.64 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	110
Tabela A.65 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	110
Tabela A.66 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 10\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	110
Tabela A.67 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e <i>underflow</i> , Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,05 \text{ atm}$	111
Tabela A.68 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,05 \text{ atm}$	112
Tabela A.69 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,05 \text{ atm}$	112

Tabela A.70 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,05 \text{ atm}$	112
Tabela A.71 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,05 \text{ atm}$	113
Tabela A.72 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,05 \text{ atm}$	113
Tabela A.73 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	114
Tabela A.74 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	114
Tabela A.75 – Cálculo da concentração mássica para o Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	115
Tabela A.76 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	115
Tabela A.77 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	115
Tabela A.78 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> , Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	116
Tabela A.79 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	116
Tabela A.80 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	117
Tabela A.81 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	117
Tabela A.82 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	117
Tabela A.83 – Eficiência granulométrica corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 4 \pm 0,20 \text{ atm}$	118
Tabela A.84 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	119
Tabela A.85 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	119

Tabela A.86 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$.	120
Tabela A.87 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$.	120
Tabela A.88 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$.	120
Tabela A.89 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	121
Tabela A.90 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	121
Tabela A.91 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	122
Tabela A.92 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	122
Tabela A.93 – Eficiência total e diâmetro de corte para o Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	122
Tabela A.94 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Bradley $D_c = 20\text{mm}$ individual $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	122
Tabela A.95 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	123
Tabela A.96 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	123
Tabela A.97 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	124
Tabela A.98 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	124
Tabela A.99 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 20\text{mm}$ em série $\Delta P : 6 \pm 0,20 \text{ atm}$.	124
Tabela A.100 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e <i>underflow</i> , Bradley $D_c = 30\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$.	125
Tabela A.101 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 30\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$.	125

Tabela A.102 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Bradley $D_c = 30\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	126
Tabela A.103 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 30\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	126
Tabela A.104 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Bradley $D_c = 30\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	126
Tabela A.105 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Bradley $D_c = 30\text{mm}$ individual $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	127
Tabela A.106 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Bradley $D_c = 30\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	128
Tabela A.107 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclones Bradley $D_c = 30\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	128
Tabela A.108 – Cálculo da concentração mássica para o Bradley $D_c = 30\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	129
Tabela A.109 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Bradley $D_c = 30\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	129
Tabela A.110 – Eficiência total para hidrociclones Bradley $D_c = 30\text{mm}$ em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	129
Tabela A.111 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e <i>underflow</i> , Krebs individual $\Delta P : 2 \pm 0,20 \text{ atm}$	130
Tabela A.112 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Krebs individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20 \text{ atm}$	131
Tabela A.113 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Krebs individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20 \text{ atm}$	131
Tabela A.114 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Krebs individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20 \text{ atm}$	131
Tabela A.115 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Krebs individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20 \text{ atm}$	132
Tabela A.116 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Krebs individual a $\Delta P : 2 \pm 0,20 \text{ atm}$	132
Tabela A.117 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Krebs em série $\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	133

Tabela A.118 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Krebs em série	
$\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	133
Tabela A.119 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Krebs em série	
$\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	134
Tabela A.120 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Krebs em série	
$\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	134
Tabela A.121 – Eficiência total para hidrociclones Krebs em série	
$\Delta P : 2 \pm 0,10 \text{ atm}$	134
Tabela A.122 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> , Krebs individual	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	135
Tabela A.123 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Krebs individual	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	136
Tabela A.124 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	136
Tabela A.125 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	136
Tabela A.126 – Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	137
Tabela A.127 – Eficiência granulométrica corte para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	137
Tabela A.128 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Krebs em série	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	138
Tabela A.129 – Cálculo da vazão mássica para hidrociclones Krebs em série a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	138
Tabela A.130 – Cálculo da concentração mássica para hidrociclones Krebs em série a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	139
Tabela A.131 – Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones Krebs em série a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	139
Tabela A.132 – Eficiência total para hidrociclones Krebs em série a	
$\Delta P : 4 \pm 0,10 \text{ atm}$	139
Tabela A.133 – Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i> Krebs individual	
$\Delta P : 6 \pm 0,05 \text{ atm}$	140
Tabela A.134 – Cálculo da vazão mássica para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 6 \pm 0,05 \text{ atm}$	140

Tabela A.135 – Cálculo da concentração mássica para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 6 \pm 0,05 \text{ atm}$	141
Tabela A.136 - Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para o hidrociclone	
Krebs individual a $\Delta P : 6 \pm 0,05 \text{ atm}$	141
Tabela A.137 - Eficiência total e diâmetro de corte para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 6 \pm 0,05 \text{ atm}$	141
Tabela A.138 – Eficiência granulométrica para o hidrociclone Krebs individual a	
$\Delta P : 6 \pm 0,05 \text{ atm}$	142
Tabela A.139 - Distribuição granulométrica das correntes de alimentação e do <i>underflow</i>	
Krebs em série a $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	143
Tabela A.140 - Cálculo da vazão mássica para hidrociclones Krebs em série	
$\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	143
Tabela A.141 - Cálculo da concentração mássica para hidrociclones Krebs em série	
$\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	144
Tabela A.142 - Resultados das correntes de alimentação e <i>underflow</i> para hidrociclones Krebs	
em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	144
Tabela A.143 - Eficiência total para hidrociclones Krebs em série $\Delta P : 6 \pm 0,10 \text{ atm}$	144

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área da seção transversal da partícula	- [-]
b_r	- intensidade do campo externo	- [LT ²]
c_v	- concentração volumétrica de sólidos na alimentação	- [-]
c_{vu}	- concentração volumétrica de sólidos no <i>underflow</i>	- [-]
c_w	- concentração mássica de sólidos na alimentação	- [-]
c_{wu}	- concentração mássica de sólidos no <i>underflow</i>	- [-]
d_c	- diâmetro crítico	- [L]
D_c	- diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone	- [L]
D_i	- diâmetro do duto de alimentação	- [L]
D_o	- diâmetro do <i>overflow</i>	- [L]
D_u	- diâmetro do <i>underflow</i>	- [L]
d_p	- diâmetro de uma partícula	- [L]
d_{50}	- diâmetro de corte	- [L]
d'_{50}	- diâmetro de corte reduzido	- [L]
d^*	- parâmetro dos modelos de distribuição granulométrica	- [L]
E_T	- eficiência total	- [%]
E'_T	- eficiência total reduzida	- [%]
Eu	- número adimensional de Euler	- [-]
G	- eficiência granulométrica	- [%]
G'	- eficiência granulométrica reduzida	- [%]
ℓ	- comprimento do <i>vortex finder</i>	- [L]
L	- comprimento do hidrociclone	- [L]
L_1	- comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone	- [L]
m	- parâmetro determinado empiricamente para cada família do hidrociclone	- [-]
M	- massa de sólidos na alimentação	- [M]
M_b	- massa do béquer	- [M]
M_p	- massa da partícula	- [M]

M_{sp}	- massa da suspensão	- [M]
M_u	- massa de sólidos no <i>underflow</i>	- [M]
n	- parâmetro dos modelos de distribuição granulométrica	- [-]
Q	- vazão volumétrica da suspensão na alimentação do hidrociclone	- [L ³ /T]
Q_u	- vazão volumétrica da suspensão no <i>underflow</i> do hidrociclone	- [L ³ /T]
Q_1	- vazão volumétrica da suspensão na centrífuga 1	- [L ³ /T]
Q_2	- vazão volumétrica da suspensão na centrífuga 2	- [L ³ /T]
r	- distância do centro de rotação do equipamento	- [L]
R	- raio da seção cilíndrica do hidrociclone	- [L]
Re	- número adimensional de Reynolds	- [-]
R_L	- razão de líquido	- [%]
Stk_{50}	- número adimensional de Stokes	- [-]
T	- tempo de residência da partícula no interior do hidrociclone	- [T]
u_c	- velocidade característica do fluido no hidrociclone	- [L/T]
u_i	- velocidade de entrada do fluido	- [L/T]
u_r	- velocidade radial do fluido	- [L/T]
u_z	- velocidade axial do fluido	- [L/T]
u_θ	- velocidade tangencial do fluido	- [L/T]
v_r	- velocidade radial da partícula	- [L/T]
v_t	- velocidade terminal da partícula no regime de Stokes	- [L/T]
v_z	- velocidade axial da partícula	- [L/T]
v_θ	- velocidade tangencial do partícula	- [L/T]
V_p	- volume da partícula	- [L ³]
W	- vazão mássica da alimentação	- [M/T]
W_o	- vazão mássica do <i>overflow</i>	- [M/T]
W_s	- fração mássica de sólidos alimentados	- [-]
W_{su}	- fração mássica de sólidos recuperados no <i>underflow</i>	- [-]
W_u	- vazão mássica do <i>underflow</i>	- [M/T]
X	- fração mássica da partícula na alimentação menor que certo diâmetro analisado	- [-]

X_u	- fração mássica da partícula no <i>underflow</i> menor que certo diâmetro analisado	- [-]
$(-\Delta P)$	- queda de pressão entre a alimentação do hidrociclone e o meio externo	- [M/LT ²]
α_1	- parâmetro determinado empiricamente para cada família do hidrociclone	- [-]
$\Delta\rho$	- diferença entre as densidades do líquido e do sólido	- [M/L ³]
ϕ	- esfericidade	- [-]
η_1	- eficiência relativa da centrífuga 1	- [%]
η_2	- eficiência relativa da centrífuga 2	- [%]
μ	- viscosidade da suspensão	- [M/LT]
θ	- ângulo da parte cônica do hidrociclone	- [°]
ρ	- densidade da corrente de alimentação	- [M/L ³]
ρ_ℓ	- densidade do líquido	- [M/L ³]
ρ_p	- densidade da partícula	- [M/L ³]
ρ_u	- densidade da corrente do <i>underflow</i>	- [M/L ³]
Σ	- área equivalente	- [L ²]
ω	- velocidade angular	- [rad/T]

RESUMO

O estudo da separação de microrganismos provenientes da fermentação alcoólica vem ganhando destaque no meio científico, uma vez que, a sociedade e os órgãos ambientais exigem cada vez mais das empresas, ações que visem a recuperação e o reaproveitamento de subprodutos industriais. O objetivo deste trabalho, foi avaliar experimentalmente o desempenho de separação de hidrociclones no processamento de suspensões contendo leveduras de *Saccharomyces cerevisiae*. Foram testados hidrociclones de geometria AKW ($D_c = 10$ mm), Bradley ($D_c = 10, 20$ e 30 mm) e Krebs ($D_c = \frac{1}{2}$ in) individuais e operando em série. Nas separação do fermento em água foram utilizadas leveduras a 0,25% e 3% em massa e, o mosto fermentado a uma concentração de leveduras de 3% em massa. Todos os testes foram realizados a três diferentes quedas de pressão (2, 4 e 6 atm) à temperatura constante (ambiente). Como resultados verificou-se elevadas eficiências totais com dois hidrociclones operando em série e viabilidades celulares superiores a 80%. Para hidrociclones individuais, obteve-se eficiências totais de separação entre 29 e 36% para hidrociclones Krebs. Para hidrociclones Bradley foram obtidas eficiências totais de separação entre 45 e 49%, enquanto que para hidrociclone AKW foram obtidas eficiências totais entre 55 e 61%. Todos os hidrociclones estudados apresentaram alta razão de líquido com valores entre 25 e 51%. O procedimento experimental adotado neste trabalho permitiu também obter curvas de eficiência granulométrica de separação de leveduras e do mosto fermentado, bem como verificar, na maioria dos casos, a ocorrência do efeito *fish hook*.

Palavras-chave: Hidrociclone, leveduras, mosto fermentado, separação sólido-líquido.

ABSTRACT

The study of separation of cell from alcoholic fermentation is gaining more attention in the academic researches, because the society and the government are demanding attitudes from the companies to recover and reuse the industrial sub-products. The objective of this work was experimentally evaluate the acting of separation in hydrocyclones in the processing of suspension containing yeast of *Saccharomyces cerevisiae*. It was tested equipments in geometry AKW ($D_c = 10$ mm), Bradley ($D_c = 10, 20$ e 30 mm) and Krebs ($D_c = \frac{1}{2}$ in) in individual or in series basis. The suspensions used was yeast in water in 0,25% and 3% in mass, and the fermented most of 3% in mass. All the tests was made in three different pressure drop (2, 4 and 6 atm) in a constant temperature (room). In the results, it was verified high total efficiencies of separation with two hydrocyclones working in series and cellular viability superior of 80%. It was obtained total efficiencies between 29 and 36% to the hydrocyclone Krebs. To the Bradley hydrocyclone it was found total efficiency of separation between 45 and 49%, while to the AKW hydrocyclone it was found total efficiency of separation between 55 and 61%. All the hydrocyclones studied shown high flow ratio between 25 and 51%. The experimental procedure used in this work also allowed obtaining curves of reduced grade efficiency in the separation of yeast and the fermented most. It was also possible verify in most of the cases, the occurrence of *fish hook* effect.

Keywords: Hydrocyclone, yeast, fermented most, solid-liquid separation

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A separação de microrganismos provenientes da fermentação alcoólica vem ganhando destaque no meio científico. A sociedade e os órgãos ambientais exigem cada vez mais das empresas, ações que visem a recuperação e o reaproveitamento de subprodutos industriais. Atualmente, são utilizadas centrífugas tubulares, operando em série e elevadas rotações, para atingir uma eficiência total de separação considerada satisfatória, cerca de 85%, (MATTA; MEDRONHO, 2000). Outras técnicas de separação desses microrganismos vêm sendo estudadas, como a sedimentação flocculenta, a flotação, além do uso de mini-hidrociclones.

Atualmente, os separadores centrífugos têm grande aplicação industrial na separação de microrganismos proveniente da fermentação alcoólica. Neste tipo de separação, a força centrífuga oriunda do tipo de escoamento no interior do equipamento, é utilizada para promover a separação. O depósito de sólido formado sobre a parede interna, desliza, sendo removido continuamente para o fundo (saída cônica) do equipamento (SVAROVSKY, 1981).

Os métodos de separação que empregam forças centrífugas fazem com que as partículas sejam direcionadas contra as superfícies internas do equipamento. Existem dois tipos de separadores centrífugos: os de corpo giratório (centrífugas) e os de corpo fixo (hidrociclones).

Dentre alguns exemplos de aplicação da operação de centrifugação, pode-se destacar a separação de suspensões biológicas, a clarificação de sucos e o tratamento de efluentes. Outros separadores centrífugos conhecidos e utilizados são os ciclones e os hidrociclones.

Segundo ORTEGA-RIVAS (2002), os hidrociclones apresentam algumas vantagens em relação às centrífugas, por não possuírem partes móveis e apresentarem baixos custos de confecção, manutenção e instalação. Embora a primeira patente de um hidrociclone tenha mais de 110 anos (BRETNEI, 1891), sua primeira aplicação industrial data dos anos 40. Os hidrociclones foram originalmente desenvolvidos para promover a separação sólido-líquido, mas atualmente eles também são usados para separações sólido-sólido (KLIMA; KIM, 1998), líquido-líquido (GOMES, 2002), (SMYTH; THEW, 1996) e gás-líquido (MARTI, 1996). Recentemente, investiga-se o uso de hidrociclones em sistemas de difícil separação, ou seja, aqueles em que as diferenças de densidade entre o sólido e o líquido são muito pequenas.

Novas aplicações possíveis, como separação de microrganismos do caldo de fermentação, continuam a serem desenvolvidas (YUAN *et al.*, 1996), (CILLIERS; HARRISON, 1997), (ORTEGA-RIVAS, 2002), (MEDRONHO *et al.*, 2005 a e b).

No passado recente, o procedimento de projeto e otimização de hidrociclones era uma visão bastante simplista da função do hidrociclone. O tamanho do equipamento era selecionado pela capacidade e queda de pressão exigidos, com o diâmetro de corte não sendo uma escolha livre, mas fixado pela combinação dos dois requisitos. A redução no diâmetro de corte só podia ser alcançada pelo uso de um grande número de ciclones menores em paralelo. Essa aproximação ignora completamente o efeito do tamanho do orifício do *underflow* no diâmetro de corte, e também, da concentração de sólidos no *underflow*.

Para descrever o escoamento da suspensão no interior de hidrociclones utiliza-se os números adimensionais (Re , Stk_{50} e Eu). Desta forma, a descrição da operação não perde em nada quanto a sua caracterização física, pelo contrário, sua descrição é agilizada, justamente por proporcionar o decréscimo do esforço empírico, decorrente da adoção dos grupos adimensionais (SVAROVSKY, 1981). No entanto, vale a pena ressaltar que essa metodologia, de cunho essencialmente empírico, vem atualmente, passando por uma fase de transição. Recentemente, o estudo da fluidodinâmica de hidrociclones vem recebendo contribuições teóricas significativas.

A fluidodinâmica computacional (CFD) está começando a nos dar um melhor entendimento do escoamento turbulento rotacional dentro do hidrociclone. Esses efeitos de grandes redemoinhos induzem à turbulência anisotrópica. O modelo matemático do tipo $k - \varepsilon$ convencional, por exemplo, utiliza duas equações para descrever os efeitos da turbulência, baseado na viscosidade turbulenta. Essas equações são resolvidas separadamente, uma para energia cinética (k) e outra para o termo de dissipação da energia cinética (ε). Para este modelo assume turbulência isotrópica, ele usualmente fornece previsões incorretas para o modelo de escoamento. Esse problema pode ser superado tanto pela modificação do modelo original $k - \varepsilon$ ou pelo uso do modelo *stress* de Reynolds. O problema que ainda precisa ser corretamente resolvido é a junção entre a fase particulada e a fluida. Redemoinhos turbulentos, que são randômicos por natureza, e sedimentação retardada, tornam a solução teórica para a avaliação do desempenho muito complexa. Portanto, há ainda uma necessidade de modelos empíricos e semi-empíricos para descrever o desempenho de hidrociclones.

O hidrociclone não possui partes móveis e consiste de uma ou mais seções cônicas ligadas a uma parte cilíndrica, a qual possui uma alimentação ajustada para ter uma entrada tangencial da mistura. Ele é fechado com uma tampa dotada de um tubo axial para a saída de

uma corrente superior (*overflow*) e ao final da seção cônica tem uma abertura circular (*apex*) para a descarga da corrente inferior (*underflow*). O equipamento tem o formato cônico-cilíndrico, e a ação de separação baseia-se no efeito de forças centrífugas geradas pelo movimento tangencial da mistura no seu interior. As partes principais de um hidrociclone convencional estão representadas na Figura 1.1 e encontram-se definidas a seguir:

- duto de entrada da alimentação da mistura ou suspensão,
- corpo cilíndrico do separador, associado à capacidade de operação do equipamento;
- tronco cônico axial, acoplado ao corpo cilíndrico, associado ao poder de separação do separador;
- saída acoplada ao corpo cônico para descarregar as partículas coletadas, denominado de tubo de *underflow*;
- duto para a saída do líquido limpo denominado de tubo *overflow*.

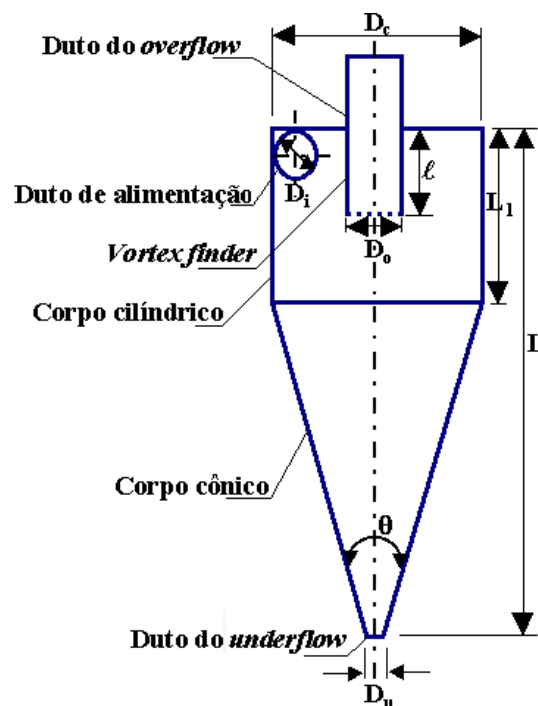


Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um típico hidrociclone.

O princípio de separação em hidrociclones baseia-se na diferença de tamanho e/ou densidade entre o meio líquido e os sólidos da mistura, utilizando força centrífuga. À medida que o fluido adentra a parte cônica do hidrociclone, maiores são os componentes de aceleração do fluido, já que a seção disponível ao escoamento vai se reduzindo. Uma vez que o *underflow* é relativamente pequeno, este permite que apenas parte da suspensão inicialmente alimentada ao ciclone seja descarregada (partículas maiores e mais densas). Diante disso, a

parcela de sólidos que não é descarregada pelo *underflow*, ou seja, as partículas menores ou de menor densidade, permanecem junto ao eixo central do equipamento, formando um vórtex interno menor direcionado para a saída acoplada ao corpo cilíndrico e com movimento rotacional inverso àquele criado pelo vórtex externo (SVAROVSKY, 1984). Uma ilustração dos vórtex formados pelo movimento rotacional do fluido, está representados na Figura 1.2.

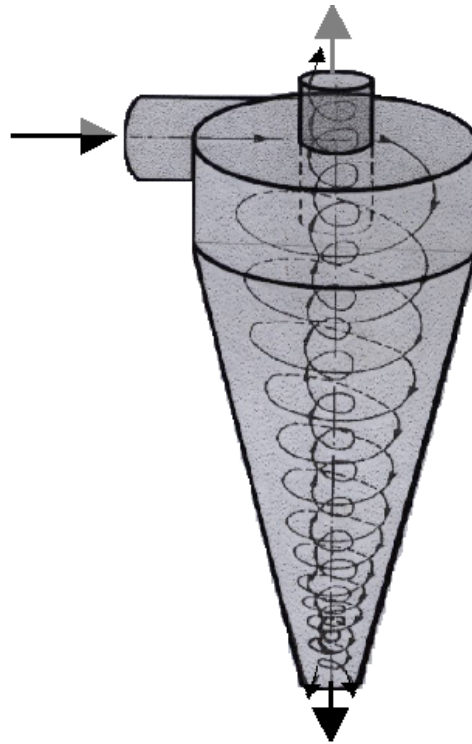


Figura 1.2 – Trajetória da suspensão no interior do hidrociclone.

As principais aplicações dos hidrociclones são:

- **Espessamento:** tem a finalidade de concentrar uma suspensão.
- **Deslamagem:** visa eliminar partículas finas facilitando tratamentos sucessivos como filtração, flotação e outras operações similares.
- **Classificação seletiva:** objetiva a separação por diferenças entre densidades para uma alimentação não homogênea.
- **Fracionamento:** visa a separação em duas correntes (grossa e fina) para tratamentos posteriores.
- **Pré-concentração:** consiste em utilizar a diferença de densidades para aumentar a concentração da alimentação.
- **Recuperação de líquidos:** é uma operação utilizada para recuperação e reciclagem de águas de processo.

Um outro fenômeno que ocorre no interior de um hidrociclone, é a formação de um núcleo central de gás (*air core*). O vórtice provocado pelo escoamento do fluido produz uma região de baixa pressão no eixo central do equipamento, que normalmente resulta na formação de uma superfície rotacional livre de líquido por toda a extensão axial do hidrociclone. Se os orifícios de *overflow* e de *underflow* estão ligados à atmosfera, o núcleo formado no eixo axial do aparelho é preenchido com ar. A formação do núcleo de ar é bastante importante, visto que é uma indicação de estabilidade de vórtice (SVAROVSKY, 1984).

Segundo SVAROVSKY (1984), os diâmetros dos hidrociclones variam, normalmente, entre 10 mm e 2,5 m. As vazões volumétricas usuais variam entre 0,1 e 7200 m³/h. A queda de pressão de trabalho varia entre 0,34 e 6 bar. A concentração de sólidos que pode ser atingida no *underflow* raramente excede a 45 ou 50 % em volume, dependendo do tamanho da unidade, das condições de operação e da natureza do sólido que está sendo separado.

Levando em conta os aspectos mencionados anteriormente, o foco principal do trabalho desenvolvido foi avaliar a utilização de mini-hidrociclones na separação de leveduras da fermentação alcoólica. O emprego de mini-hidrociclones na separação dessas leveduras, em substituição às centrífugas tubulares, depende de aspectos relacionados à capacidade de processamento, eficiência de separação e viabilidade celular. No estudo desenvolvido analisou-se a influência de algumas condições operacionais (Queda de pressão, tipo de equipamento e suspensão utilizada) na eficiência de separação de suspensões contendo leveduras de *Saccharomyces cerevisiae*. Os hidrociclones empregados no estudo seguem as proporções geométricas recomendadas por Bradley ($D_c = 10, 20 \text{ e } 30 \text{ mm}$) e os mini-hidrociclones comerciais Krebs ($D_c = \frac{1}{2} \text{ in}$) e AKW ($D_c = 10 \text{ mm}$).

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os separadores centrífugos (centrífugas e hidrociclones), viabilidade celular e também alguns aspectos sobre a fermentação alcoólica.

O Capítulo 3 destina-se a apresentação dos materiais e as metodologias empregadas neste trabalho.

No Capítulo 4 os principais resultados obtidos serão apresentados e discutidos.

No Capítulo 5 serão apresentadas as principais conclusões e relacionadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISAO BIBLIOGRÁFICA

2.1. – INTRODUÇÃO

A operação de separação sólido-líquido conduzida a partir de suspensões diluídas - a decantação – pode ser analisada através do estudo da trajetória das partículas no interior do equipamento de separação. A decantação ou sedimentação centrífuga baseia-se na diferença de tamanho das partículas e no gradiente de densidade entre as fases. Como decorrência da geometria de escoamento da suspensão no interior do separador, os sólidos estão sujeitos a forças centrífugas. Essas forças são responsáveis pelo deslocamento das partículas na direção da parede ou para o centro do equipamento, dependendo se são mais leves ou mais densas que o líquido. A sedimentação centrífuga foi originalmente desenvolvida para promover a separação sólido-líquido, mas atualmente ela também é usada para separação sólido-sólido (KLIMA; KIM, 1998), líquido-líquido (GOMES, 2002) e gás-líquido (MARTI, 1996). Novas aplicações possíveis, como separação de microrganismos do caldo de fermentação, estão em desenvolvimento (YUAN *et al.*, 1996 e CILLIERS; HARRISON 1997).

Na modelagem matemática da separação centrífuga, usualmente são adotadas as seguintes considerações (MASSARANI, 1997):

- a) As partículas são caracterizadas individualmente através do diâmetro volumétrico (d_p) e de um fator de forma, usualmente a esfericidade (ϕ);
- b) A distribuição de tamanhos das partículas, isto é, a análise granulométrica, seja expressa por uma função monofônica e crescente do tipo $X = X(d_p)$, sendo X a fração em massa das partículas com diâmetro menor que d_p ;
- c) O campo de velocidade do fluido não é perturbado pela presença das partículas;
- d) Os efeitos da aceleração e concentração de partículas sejam desprezados no comportamento dinâmico dessas partículas;
- e) A velocidade terminal da partícula no campo centrífugo se dá em regime de Stokes.

O projeto e a análise de desempenho do equipamento de separação sólido-fluido podem ser realizados tomando-se por base os seguintes parâmetros:

- a) Equação que relaciona o diâmetro de corte (d_{50}) com as propriedades físicas do sistema fluido-sólido, as dimensões do equipamento e as condições operacionais;
- b) Função eficiência individual de coleta relativa à partícula com diâmetro d_p , que depende da configuração do equipamento, do regime de escoamento do fluido e da dinâmica da partícula (interação sólido-líquido);
- c) Função eficiência global de coleta que é dependente da distribuição granulométrica do conjunto de partículas;
- d) A equação que relaciona a queda de pressão e a vazão da suspensão no equipamento de separação.

2.2. – CENTRÍFUGAS

De um modo geral, as centrífugas podem ser divididas em centrífugas de filtração e centrífugas de sedimentação e podem operar de modo contínuo e batelada. A centrífuga de sedimentação do tipo com rotor de discos, por exemplo, opera com rotações capazes de transmitir às partículas acelerações centrífugas entre 3000 a 20000 vezes a gravidade. As centrífugas são projetadas para separação sólido-líquido ou líquido-líquido em base contínua. Os sólidos sedimentam na parede do vaso e são descarregados manualmente ou automaticamente por aberturas intermitentes do vaso. A pilha de discos aumenta bastante a área efetiva de sedimentação ou clarificação, e as fases líquida e sólida movem-se para cima ou para baixo na superfície dos discos. O líquido é descarregado através de um ou mais discos. A Figura 2.1 ilustra de modo esquemático os principais elementos da centrífuga de discos com descarga por bocais.

A equação do movimento para uma partícula sólida submetida a um campo centrífugo pode ser estabelecida a partir do balanço das forças (campo externo, empuxo e arraste) que atuam sobre uma partícula sólida imersa num fluido sob ação do campo centrífugo.

A trajetória da partícula assinalada no esquema da centrífuga tubular da Figura 2.2 permite especificar a partícula com diâmetro “crítico” (d_c), isto é, que é coletada com eficiência de 100%. Para facilitar a análise, considera-se que as partículas sejam esféricas e que prevaleça o regime de Stokes: v = velocidade da partícula e u = velocidade média do fluido na centrífuga tubular.

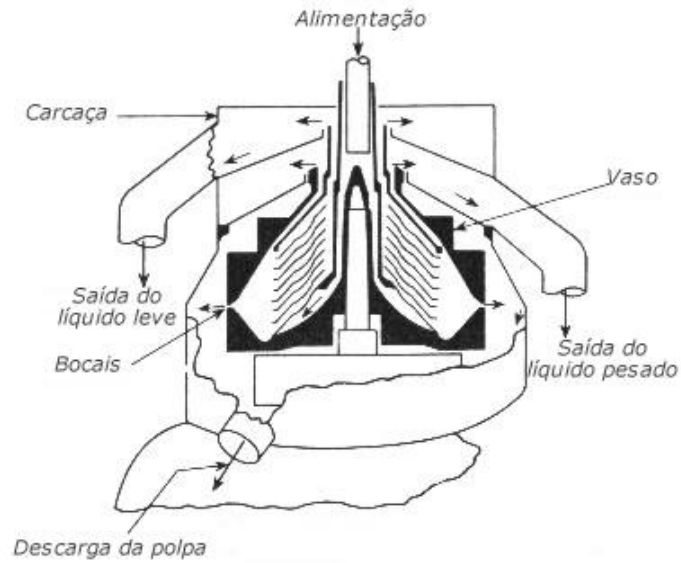


Figura 2.1– Centrífuga de discos com descarga por bocais.

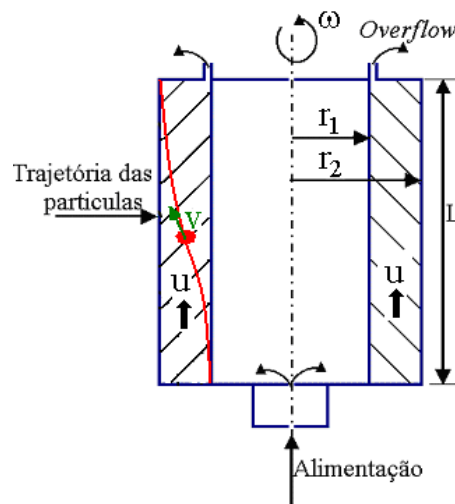


Figura 2.2– Esquema da centrífuga tubular.

Nessa situação pode-se fazer as seguintes simplificações:

- Componentes da velocidade do fluido: $u_r = 0$ (radial) e $u_\theta = r \omega$ (tangencial)
- Campo centrífugo: $b_r = v_\theta^2 / r$ e $b_\theta = 0$
- Velocidade tangencial da partícula: $v_\theta = u_\theta = \omega r$

Desprezando a aceleração da partícula, para ω a velocidade angular da carcaça cilíndrica, tem-se a velocidade radial da partícula, observada na Equação (2.1):

$$v_r = \frac{dr}{dt} = v_t = \left[\frac{(\rho_p - \rho_\ell) V_p b_r}{\frac{A}{2} \rho_\ell C_D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

2.2.1. – O CONCEITO SIGMA

O conceito sigma (Σ) é uma característica da própria centrífuga e não do sistema que está sendo separado. Por isso, o fator pode ser usado como um **parâmetro de comparação** entre centrifugadores.

Segundo SVAROVSKY (1984), a Equação (2.2), constitui a base para a especificação da centrífuga para uma dada tarefa, conhecendo o desempenho de uma centrífuga de laboratório (chamado *scale up* entre centrífugas de mesmo tipo, operando com a mesma suspensão). Para centrífugas de configurações diferentes é usado o termo de eficiência relativa, Equação (2.3):

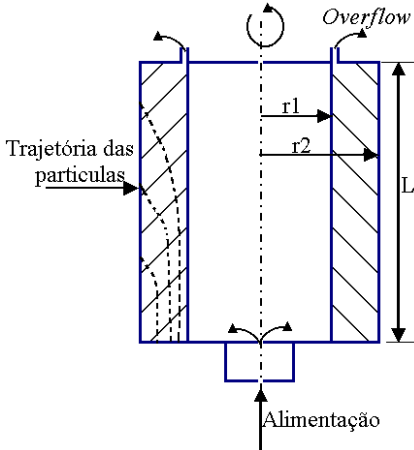
$$\frac{Q_1}{\Sigma_1} = \frac{Q_2}{\Sigma_2} \quad (2.2)$$

$$\frac{Q_1}{\eta_1 \Sigma_1} = \frac{Q_2}{\eta_2 \Sigma_2} \quad (2.3)$$

onde a eficiência relativa para as centrífugas tubular, cesta sem furos, *Scroll-type*, e centrífuga de discos é de 90%, 75%, 60% e 45%, respectivamente.

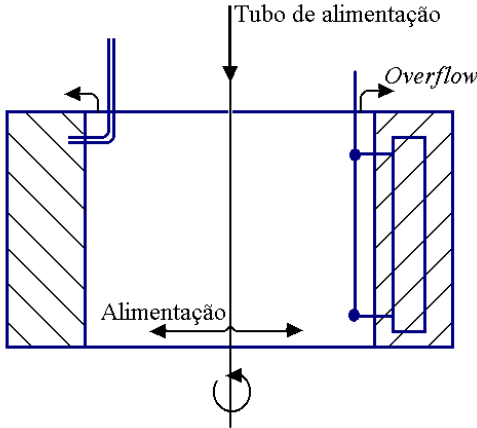
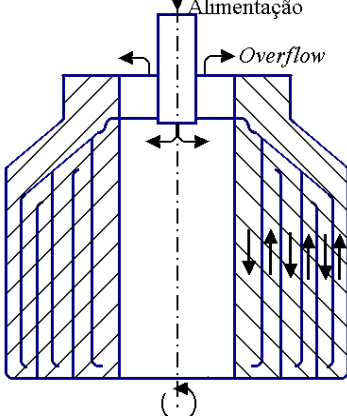
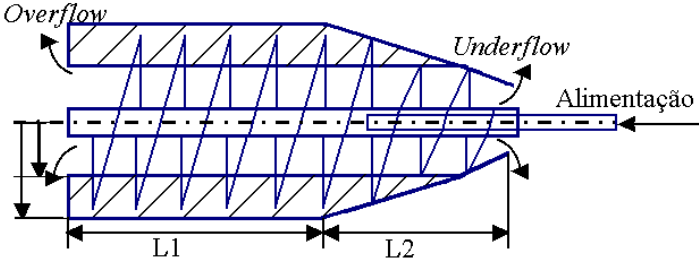
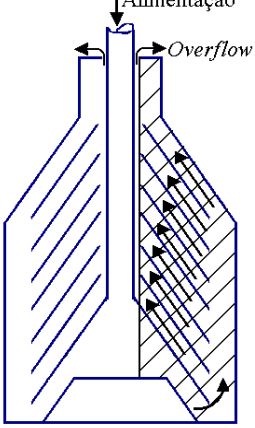
Uma comparação entre os tipos de centrífugas mais conhecidas está apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais tipos de centrífugas.

Tipo da Centrífuga	Rotação (RPM)	Diagrama	Vazão (m ³ /h)
Tubular	15000 a 50000		0,4 a 4

Continua

Continuação

Tipo cesta sem furos	450 a 3500		6 a 10
Centrífuga Multi – câmara	4500 a 8500		2,5 a 10
Centrífuga <i>Scroll-type</i>	1600 a 6000		0,4 a 60
Centrífuga de discos	>12000		100

2.3 – HIDROCICLONES

Tal qual as centrífugas, os hidrociclones utilizam a sedimentação em campo centrífugo como princípio de separação. Eles, por não possuírem partes móveis, apresentam algumas vantagens quando comparados às centrífugas, como por exemplo, baixo custo de aquisição e manutenção (LUBBERSTEDT *et al*, 2003).

Segundo CILLIERS; HARRISON (1997 a) é crescente a utilização de hidrociclones de pequeno diâmetro, na medida que são capazes de promover pequenos diâmetros de corte, mesmo em condições adversas (partículas finas, pequeno gradiente de densidade e líquido com elevada viscosidade) para a separação. A redução do diâmetro do hidrociclone, associada a uma elevada pressão de alimentação da mistura, são condições que asseguram uma grande força centrífuga no interior do separador. Como consequência dessas condições operacionais, tem-se no interior dos mini-hidrociclones escoamentos com elevada turbulência. As forças cisalhantes decorrentes podem, eventualmente, reduzir substancialmente a viabilidade celular através do rompimento da parede celular. Essas forças podem também desfazer os aglomerados, contribuindo para uma redução do diâmetro médio das leveduras. O uso potencial de hidrociclones na concentração de suspensões microbiológicas é atraente, pois eles operam de modo contínuo, requerendo baixo custo de manutenção e podem ser prontamente esterilizados. A separação de células microbiológicas de um meio de cultura é necessária na maior parte dos processos microbiológicos, onde o grande desafio é a separação desta partículas pequenas (tipicamente entre 1 e 20 μm de diâmetro) e baixa diferença de densidade entre as fases.

Na literatura, encontram-se vários estudos sobre o desempenho de hidrociclones de pequenos diâmetros (com diâmetro da parte cilíndrica, D_c na faixa de 7 a 20 mm) na separação de partículas finas. Nestes estudos são observados os efeitos da geometria, queda de pressão/vazão de operação, concentração e temperatura na eficiência total de separação (YUAN *et al*, 1996); (MATTA, MEDRONHO, 2000); (LUBBERSTEDT *et al*, 2003).

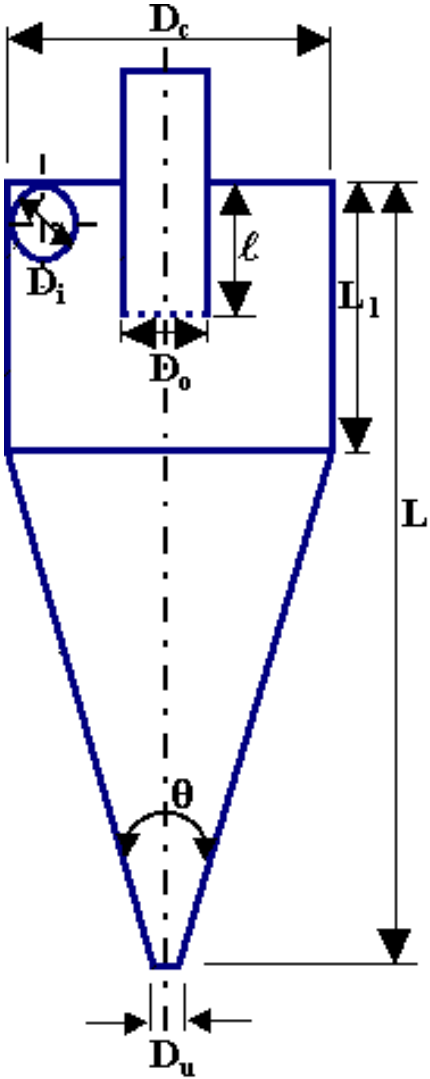
2.3.1 – “FAMÍLIAS” DE HIDROCICLONES

Segundo ORTEGA-RIVAS (2002) os hidrociclones possuem grande potencial para aplicações em processos biológicos onde normalmente as centrífugas são consideradas a única alternativa. São encontrados na literatura vários estudos sobre o efeito das proporções geométricas na eficiência de separação em hidrociclones. Usando estas informações, pode-se

selecionar a geometria do hidrociclone com o propósito de obter a performance desejada em termos de diâmetro de corte.

Estas relações geométricas são caracterizadas por distintas proporções entre as dimensões destes equipamentos em relação ao diâmetro da parte cilíndrica (D_c). Tais proporções, também conhecidas como “famílias”, usualmente apresentam resultados de eficiência de separação e concentração das correntes efluentes distintos, aspectos que motivam estudos relacionados à otimização para uma situação específica. A Tabela 2.2 apresenta alguns tipos clássicos de “famílias” de hidrociclones.

Tabela 2.2 – Relações geométricas entre dimensões dos hidrociclones (SVAROVSKY, 1984).

	Tipo e tamanho dos hidrociclones	Proporções Geométricas				
		D_i/D_c	D_o/D_c	l/D_c	L/D_c	θ (°)
	Rietema, $D_c = 0,075$ m	0,28	0,34	0,4	5	20
	Bradley, $D_c = 0,038$ m	0,133	0,20	0,33	6,85	9
	Mozley, $D_c = 0,022$ m	0,154	0,214	0,57	7,43	6
	Mozley, $D_c = 0,044$ m	0,160	0,25	0,57	7,71	6
	Warman, $D_c = 0,076$ m	0,29	0,20	0,31	4,0	15
	Hi – Klone, $D_c = 0,097$ m	0,175	0,25	0,92	5,6	10
	AKW, $D_c = 0,125$ m	0,20	0,32	0,8	6,24	15
	Demco, $D_c = 0,051$ m	0,217	0,50	1,0	4,7	25
	Demco, $D_c = 0,102$ m	0,244	0,313	0,833	3,9	20

2.4 – FORMULAÇÃO

Nesta seção, são apresentados os principais conceitos fundamentais no estudo de hidrociclones, tais como: eficiência total de separação, eficiência granulométrica ou de separação por tamanho, grupos adimensionais relevantes e alguns modelos matemáticos que buscam descrever a separação em hidrociclones.

2.4.1 – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO

O princípio de separação em hidrociclones baseia-se na diferença de tamanho e de densidade entre o meio líquido e os sólidos da mistura utilizando força centrífuga. Uma fração do líquido, juntamente com as partículas que possuem maior velocidade terminal são descarregadas através do duto de saída do concentrado (*underflow*). O restante do líquido com as partículas de menor velocidade terminal, são descarregadas através do duto de saída do diluído (*overflow*).

O hidrociclone age como um divisor de fluxo, conhecido como efeito T, desta forma, mesmo que o hidrociclone não esteja separando devido à ação centrífuga, uma quantidade de sólidos é removida no concentrado, numa fração igual à razão de líquido.

A razão de líquido é a relação entre as vazões de líquido no *underflow* e na alimentação, conforme observado na Equação (2.4),

$$R_L = \frac{Q_u(1 - c_{vu})}{Q(1 - c_v)} \quad (2.4)$$

onde c_{vu} e c_v representam, respectivamente, as concentrações volumétricas no *underflow* e na alimentação e Q_u e Q , as vazões volumétricas das mesmas correntes.

Assim,

$$c_v = \frac{c_w}{\rho_p \left(\frac{1 - c_w}{\rho_\ell} + \frac{c_w}{\rho_p} \right)} \quad (2.5)$$

$$c_{vu} = \frac{c_{wu}}{\rho_p \left(\frac{1 - c_{wu}}{\rho_\ell} + \frac{c_{wu}}{\rho_p} \right)} \quad (2.6)$$

onde ρ_ℓ e ρ_p são, respectivamente, as densidades do líquido e do sólidos e c_w e c_{wu} são as concentrações mássicas da alimentação e do *underflow*.

Vale lembrar que:

$$Q_u = \frac{M_u}{\rho_u} \quad (2.7)$$

$$Q = \frac{M}{\rho} \quad (2.8)$$

2.4.1.1 – EFICIÊNCIA TOTAL OU GLOBAL (E_T)

A eficiência total do hidrociclone dá a fração mássica de sólidos recuperados no *underflow* (W_{su}), conforme observado na Equação (2.9)

$$E_T = \frac{W_{su}}{W_s} \quad (2.9)$$

2.4.1.2 – EFICIÊNCIA TOTAL REDUZIDA (E'_T)

A eficiência total reduzida, também conhecida como eficiência centrífuga é calculada subtraindo-se o efeito T, ou seja, a razão de líquido para que se possa obter a verdadeira performance de separação em hidrociclones. Já que na eficiência total são considerados todos os sólidos existentes no concentrado, mesmo aqueles que não foram separados devido à ação do campo centrífugo. Desta forma, para a quantificação de desempenho em hidrociclones, a eficiência total reduzida é mais amplamente utilizada, Equação (2.10).

$$E'_T = \frac{E_T - R_L}{1 - R_L} \quad (2.10)$$

2.4.1.3 – EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA [G(d)]

Na eficiência granulométrica, também conhecida como eficiência por tamanho, as partículas sólidas que entram no duto de alimentação do hidrociclone apresentam uma distribuição de tamanhos e, portanto, são separadas a diferentes valores de eficiências, Equação (2.11).

$$G(d) = \frac{W_{su} dX_u(d)}{W_s dX(d)} = E_T \frac{dX_u(d)}{dX(d)} \quad (2.11)$$

O diâmetro de corte (d_{50}), ou seja, o diâmetro da partícula que é coletado com eficiência de 50%, pode ser obtido através da resolução da Equação (2.12). A maioria das partículas menores que este diâmetro sairá no diluído (*overflow*) enquanto que a maioria das partículas com diâmetro superior a este, serão separadas na corrente do concentrado (*underflow*).

$$G(d_{50}) = E_T \frac{dX_u(d_{50})}{dX(d_{50})} = 0,50 \quad (2.12)$$

2.4.1.4 – EFICIÊNCIA GRANULOMÉTRICA REDUZIDA [G'(d)]

Devido ao fato de que a eficiência granulométrica mínima, igual à razão de líquido, é sempre produzida na operação de um hidrociclone devido ao efeito T. A definição de eficiência granulométrica reduzida considera apenas a separação centrífuga, conforme observado na Equação (2.13).

$$G'(d) = \frac{G(d) - R_L}{1 - R_L} \quad (2.13)$$

Pode-se também relacionar a eficiência granulométrica reduzida com a eficiência global reduzida através da Equação (2.14).

$$E'_T = \int_0^1 G'(d) dX(d) \quad (2.14)$$

O diâmetro de partícula para o qual a eficiência granulométrica reduzida é de 50%, é conhecido como diâmetro de corte reduzido (d'_{50}) e pode ser obtido a partir da resolução numérica da Equação (2.15). Este conceito é útil para avaliação do poder de classificação de hidrociclones.

$$G'(d_{50}) = \frac{E_T \frac{dX_u(d'_{50})}{dX(d'_{50})} - R_L}{1 - R_L} = 0,50 \quad (2.15)$$

2.4.2 – GRUPOS ADIMENSIONAIS RELEVANTES

A aplicação das equações da continuidade e do movimento na descrição do escoamento em hidrociclones, leva a expressões bastante complexas para a utilização prática. Uma alternativa para a abordagem matemática da separação em hidrociclones é a utilização de grupos adimensionais.

Segundo SVAROVSKY (1984), para a determinação dos números adimensionais, em caso de suspensões diluídas, destacam-se como variáveis importantes o diâmetro do hidrociclone D_c , o diâmetro de corte reduzido d'_{50} , a queda de pressão entre as correntes de alimentação e do diluído ($-\Delta P$), a viscosidade do fluido μ , a densidade do fluido ρ_ℓ , a diferença de densidade entre o sólido e o fluido $\Delta\rho$, a razão de líquido R_L , a concentração volumétrica de sólidos na alimentação c_v e a vazão volumétrica de alimentação Q .

As unidades destas variáveis estão descritas a seguir:

- d'_{50} - diâmetro de corte reduzido, [$M^0 L^1 T^0$]
- D_c - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, [$M^0 L^1 T^0$]
- Q - vazão volumétrica de alimentação do hidrociclone, [$M^0 L^3 T^{-1}$]
- ρ_ℓ - densidade do líquido, [$M^1 L^{-3} T^0$]
- $\Delta\rho$ - diferença entre as densidades da partícula e do líquido, [$M^1 L^{-3} T^0$]
- μ - viscosidade do líquido, [$M^1 L^{-1} T^{-1}$]

- c_v -concentração volumétrica, [$M^0 L^0 T^0$]
- R_L -razão de líquido, [$M^0 L^0 T^0$]
- $(-\Delta P)$ -queda de pressão observada entre a entrada da suspensão e a saída de clarificado, [$M^1 L^{-1} T^{-2}$].

No estudo de hidrociclones, os grupos adimensionais de interesse são os números de Stokes (Stk_{50}), Euler (Eu) e Reynolds (Re), definidos a seguir:

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_p - \rho_\ell) u_c (d'_{50})^2}{18 \mu D_c} \quad (2.16)$$

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho_\ell u_c^2} \quad (2.17)$$

$$Re = \frac{D_c u_c \rho_\ell}{\mu} \quad (2.18)$$

As equações acima usam a velocidade superficial no corpo cilíndrico do hidrociclone como sendo a velocidade característica, isto é:

$$u_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (2.19)$$

A concentração volumétrica da alimentação e a razão de líquido são adimensionais que também influenciam o desempenho de hidrociclones. Desta forma é conveniente relacionar os cinco grupos adimensionais conforme a Equação (2.20)

$$Stk_{50} Eu = f(Re, R_L, c_v) \quad (2.20)$$

O produto $Stk_{50} Eu$ é dado pela Equação (2.21) (SVAROVSKY, 1984).

$$Stk_{50} Eu = \frac{\pi(\rho_p - \rho_\ell)(-\Delta P) D_c (d'_{50})^2}{36 \mu \rho_\ell Q} \quad (2.21)$$

CASTILHO; MEDRONHO (2000), mostraram que o produto $Stk_{50}Eu$ é função da razão de líquido e da concentração volumétrica da suspensão de alimentação. Os autores apresentam o modelo proposto pelas Equações (2.22), (2.23) e (2.24) que descrevem a operação de hidrociclones geometricamente semelhantes, quando utilizados na separação sólido-líquido.

$$Stk_{50}Eu = k_1 \left[\ln \left(\frac{1}{R_L} \right) \right]^{n_1} e^{(n_2 c_v)} \quad (2.22)$$

$$Eu = k_2 Re^{n_3} e^{(n_4 c_v)} \quad (2.23)$$

$$R_L = k_3 \left(\frac{D_u}{D_C} \right)^{n_5} Eu^{n_6} \quad (2.24)$$

Onde: $k_1, k_2, k_3, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ e n_6 são parâmetros empíricos. Tais parâmetros encontram-se relacionados na Tabela 2.3

Tabela 2.3 – Parâmetros das Equações (2.22), (2.23) e (2.24), (CASTILHO; MEDRONHO, 2000).

Hidrociclone	Eq. (2.22)			Eq. (2.23)			Eq. (2.24)		
	k_1	n_1	n_2	k_2	n_3	n_4	k_3	n_5	n_6
Bradley	0,0550	0,66	12,0	258,0	0,37	0,0	$1,21 \cdot 10^6$	2,63	-1,12
Rietema	0,0474	0,74	9,0	371,5	0,12	-2,12	1218	4,75	-0,30

Para descrever o comportamento do hidrociclone e buscar prever sua eficiência de separação, diversos autores elaboraram algumas teorias, que são descritas a seguir.

2.4.3 – TEORIAS DE SEPARAÇÃO EM HIDROCICLONES

Os modelos de hidrociclones estão disponíveis para o cálculo das eficiências de separação das partículas sólidas e quedas de pressão em hidrociclones. Estes modelos são normalmente baseados em um ou mais dos seguintes princípios:

- Os modelos empíricos: são determinados pelo ajuste de equações aos pontos experimentais.
- Teoria da órbita de equilíbrio: uma partícula alcança uma posição radial de equilíbrio no hidrociclone onde sua velocidade terminal de queda é igual à velocidade radial do líquido. Isto significa que, se o líquido escoar para fora, a partícula irá para a parede e será separada através do *underflow*. Se o líquido escoar para dentro, as partículas irão com o líquido para o *overflow*.
- Teoria do tempo de residência: a partícula é considerada separada se ela alcançar a região da parede do ciclone dentro do tempo de residência que a partícula permanece dentro do hidrociclone.
- Teoria do escoamento turbulento de duas fases: a separação é causada pelo fluxo transversal turbulento, que flui no sentido perpendicular ao campo da força.

2.4.3.1 – 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 ciclone, 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 hidrociclone estão sujeitadas 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 hidrociclone. 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.

No interior do hidrociclone observa-se o movimento descendente do líquido junto à parede do separador e um fluxo ascendente junto ao eixo de simetria do equipamento. Dessa forma, presume-se que exista uma região de interface, desconsiderando os efeitos de turbulência, onde a velocidade vertical do líquido é nula (LZVV). Esse plano é chamado de local de velocidade vertical zero (LZVV) e pode ser visualizado na Figura 2.3. A Figura 2.4

ilustra as forças que atuam na partícula e também região, no interior do hidrociclone, onde a velocidade vertical do fluido é nula.

O diâmetro das partículas, o qual, o raio de equilíbrio, é coincidente com LZVV tem igual chance de serem coletadas no *overflow* ou no *underflow*, e são chamadas de partículas com diâmetro de corte (d_{50}).

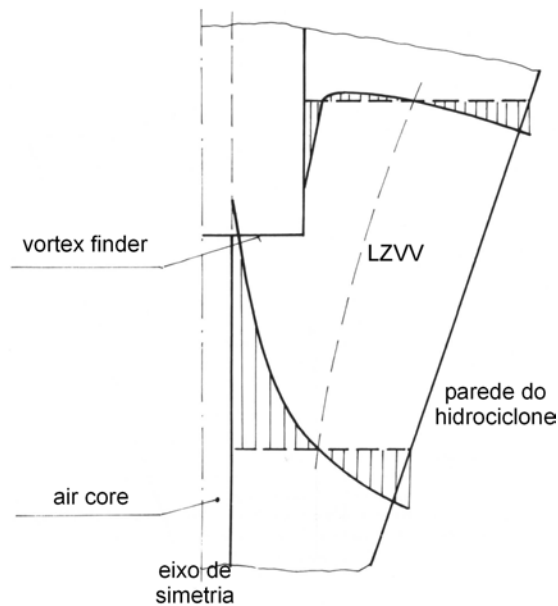


Figura 2.3 – Local de velocidade vertical zero (LZVV).

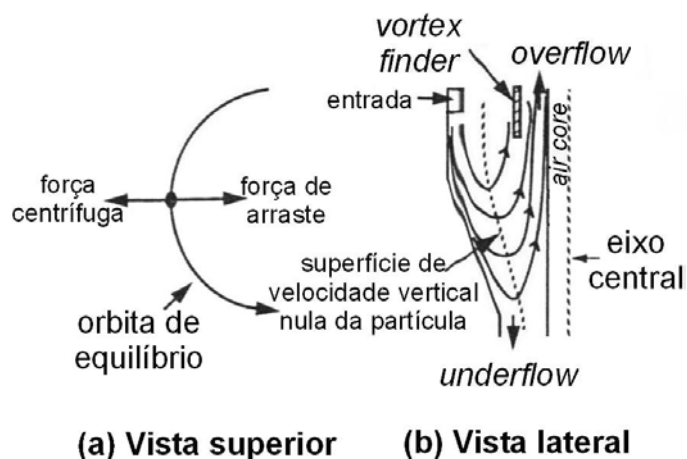


Figura 2.4 – Órbita de equilíbrio.

No topo da parte cilíndrica do separador, observa-se um fluxo secundário de fluido. Essa zona de estagnação, provocada por movimentos circulares de líquido localiza-se entre a parte superior do equipamento, a extremidade do *vortex finder* e a parede do hidrociclone,

partículas através do orifício da alimentação. O diâmetro de corte será então o diâmetro da partícula a qual, se entrar precisamente no centro do duto de alimentação irá alcançar a parede exatamente no tempo de residência T . Em termos matemáticos isso significa que a velocidade radial da partícula integrada com o tempo deve ser igual à metade do diâmetro de alimentação (Equação. 2.25). Segundo a hipótese, o diâmetro de corte será do tamanho da partícula que, ao entrar exatamente no centro do tubo da alimentação é separada precisamente no tempo de residência disponível, conforme esquema apresentado na Figura 2.6b. Se considerarmos a partícula que entra no hidrociclone na posição mais desfavorável à separação (Figura 2.6a) a mesma terá que percorrer, na pior das hipóteses, uma distância radial igual ao diâmetro do tubo de alimentação para ser separada.

$$\int_0^T v_r dt = 0,5D_i \quad (2.25)$$

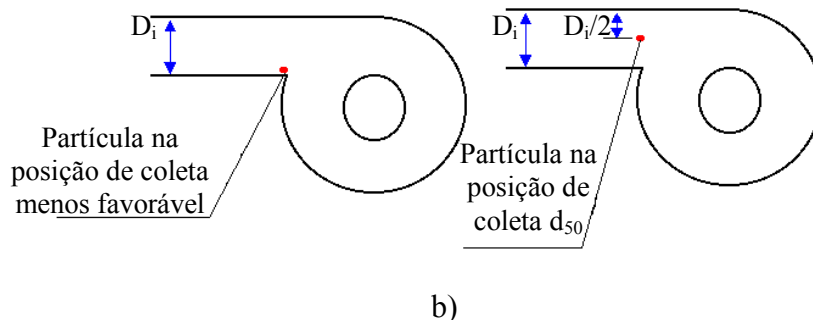


Figura 2.6 – a) Vista superior da posição de entrada de partículas na posição menos favorável, b) vista superior da posição de coleta d_{50} (posição $D_i/2$).

Em que v_r é calculada a partir da velocidade tangencial do fluido u_θ pela Equação (2.26):

$$v_r = \frac{d_{50}^2 (-\Delta P) (u_\theta)^2}{18\mu r} \quad (2.26)$$

O tempo de residência é relacionado às proporções do equipamento usando a definição de velocidade axial do fluido.

$$u_z = \frac{dz}{dt} \quad (2.27)$$

2.4.3.3 – TEORIA POPULACIONAL

Essa teoria foi primeiramente sugerida por FAHLSTROM (1960) o qual, 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 está 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.

2.4.3.4 – TEORIA DO ESCOAMENTO TURBILHONAR BIFÁSICO

Os modelos comentados anteriormente não incluem, em suas hipóteses básicas, o efeito da turbulência na operação de separação. Este efeito modifica o perfil de velocidades das fases, e altera, substancialmente, 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.

2.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PARTICULADO

O estudo da distribuição de tamanho das partículas é essencial no estudo de hidrociclones. Conhecendo-se as distribuições de tamanho do material alimentado e da corrente de *underflow*, por exemplo, pode-se calcular o diâmetro de corte que representa o poder classificatório do equipamento e permite efetuar comparações entre os hidrociclones.

Toda amostra de partículas pode ser caracterizada por uma distribuição granulométrica. Essa distribuição pode ser representada na forma cumulativa descrita por uma função $X(d_p)$, onde X é a fração mássica ou volumétrica de partículas com diâmetros inferiores ao diâmetro d_p . A descrição matemática de distribuições granulométricas

acumulativas pode ser feita através de modelos empíricos de distribuição. Alguns modelos clássicos, largamente utilizados para representar dados experimentais de distribuição granulométrica, de diversos materiais são apresentados na Tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Modelos estatísticos de distribuição granulométrica de partículas.

Nome geralmente usado	Fração de partículas com diâmetro menor que d_p	Significado físico de d^*
Probabilidade log.	$X = \text{erf} \left[\frac{\ln(d_p / d^*)}{\sigma} \right]$ Eq.(2.28)	Tamanho médio da partícula
Rosin-Rammler-Bennet (RRB) ou Wiebull	$X = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d^*} \right)^n \right]$ Eq.(2.29)	Tamanho da partícula para $X = 0,632$
Gates-Gaudin-Schumann (GGS)	$X = \left(\frac{d_p}{d^*} \right)^n$ Eq.(2.30)	Tamanho máximo da partícula
Sigmóide	$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{d^*}{d_p} \right)^n}$ Eq.(2.31)	Tamanho médio das partículas para $X = 0,50$
Gaudin-Meloy	$X = 1 - \left[1 - \left(\frac{d_p}{d^*} \right) \right]^n$ Eq.(2.32)	Tamanho máximo da partícula

O valor do parâmetro adimensional n define a forma ou *shape* da curva acumulativa, i.e., $X = X(d_p)$.

2.6 – USO DE HIDROCICLONES PARA SEPARAÇÃO DE MICRORGANISMOS PROVENIENTES DA FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA

O homem vem utilizando a fermentação alcoólica desde a mais remota antiguidade. Há mais de 4000 anos, os egípcios fabricavam o pão e produziam bebidas alcoólicas a partir de cereais e frutas. O primeiro processo industrial para a produção de microrganismos úteis ao homem constituiu-se na produção de leveduras de panificação, *Saccharomyces cerevisiae*, a qual, revelando suas qualidades nutritivas, passou a ser, posteriormente, também produzida para exclusiva e direta utilização como alimento humano ou animal. Paralelamente, a levedura obtida por certos processos fermentativos começou a ser recuperada como subproduto e comercializada como alimento protéico e vitamínico (URGEL *et al.*, 1976).

A demanda cada vez maior de etanol e as atuais legislações ambientais levam os pesquisadores e as empresas ligadas ao setor, a buscar processos de alta produtividade, reaproveitamento da água e a reutilização dos microrganismos provenientes da fermentação.

Atualmente, encontram-se vários estudos sobre o uso de hidrociclones de pequeno diâmetro na separação de microrganismos. Estes equipamentos possuem grande potencial em processos biológicos, seja na clarificação de sucos, tratamento de efluentes, separação do mosto fermentado na produção de etanol combustível e aguardente. Nestes casos, os estudos sobre o uso de hidrociclones apresentam grandes avanços onde geralmente as centrífugas são consideradas única alternativa.

Centrifugas são geralmente empregadas para promover a separação dos microrganismos provenientes da fermentação alcoólica e cerca de 85% do volume das leveduras *Saccharomyces cerevisiae* usadas, são recuperadas e recicladas para uma nova fermentação (MATTA; MEDRONHO, 2000). Entretanto, as centrífugas apresentam algumas desvantagens em relação aos hidrociclones por possuírem partes móveis, aumentando desta forma os custos de instalação e manutenção.

A alternativa proposta neste trabalho é avaliar a possibilidade de substituição das centrifugas por hidrociclones, na a separação dos microrganismos agentes da fermentação do mosto fermentado proveniente da fermentação alcoólica, como pode ser observado na Figura 2.7.

A fermentação alcoólica é um processo que redonda na formação de etanol, que pode ser usado para a queima (combustível) ou na produção de bebidas alcoólicas. Este tipo de fermentação utiliza como meio, o melaço (proveniente da produção do açúcar) ou caldo de cana e o microrganismo (*Saccharomyces cerevisiae*), o qual consome o açúcar e excreta o álcool e CO₂.

2.6.1 – AGENTE DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

Segundo URGEL *et al.* (1976), as espécies de leveduras mais usadas na produção industrial de álcool e aguardentes são as *Saccharomyces cerevisiae* e *Saccharomyces uvarum*. Porém, alguns fatores podem modificar o desenvolvimento da fermentação alcoólica, como a temperatura que afeta a velocidade de crescimento e fermentação, sendo os controles para estes efeitos, dependentes de fatores nutricionais e energéticos.

Segundo URGEL *et al.* (1976), os elementos nutritivos mais importantes são representados pelo carbono, nitrogênio, fosfatos, sais de magnésio, potássio e cálcio.

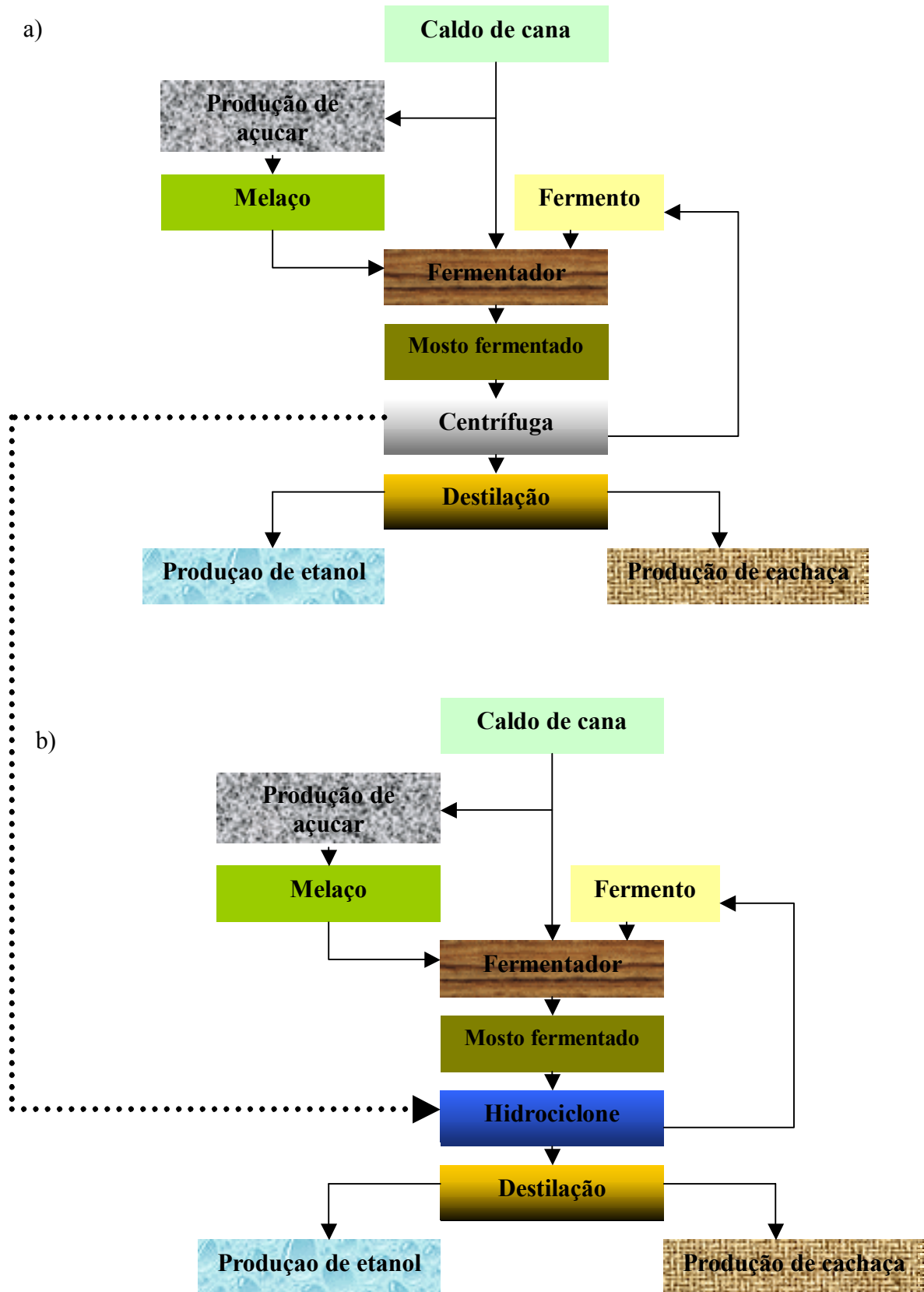


Figura 2.7 – Fluxograma simplificado da fermentação alcoólica a) Uso da centrífuga na separação de leveduras do mosto fermentado, b) Uso de hidrociclone na separação de leveduras do mosto fermentado.

Elementos em menores concentrações como o manganês, por exemplo, atuam favoravelmente em suas atividades vitais. As leveduras são mesófilas e as temperaturas ótimas para a produção do etanol estão na faixa de 26 - 35°C, porém as leveduras alcoólicas para a produção de aguardente possuem bom desempenho em temperaturas inferiores ao mínimo citado (URGEL *et al.*, 1976).

O pH ótimo situa-se entre 4 e 5, mas fermentações alcoólicas desenvolvem-se bem em níveis mais elevados em substratos a pH entre 5,8 e 5,9 (URGEL *et al.*, 1976).

No Brasil, não é usual esterilizarem-se os mostos nas destilarias de álcool e de aguardente para controlar o problema de contaminação, usam-se anti-sépticos para criar um ambiente favorável ao desenvolvimento de leveduras e desfavorável a outros microrganismos (URGEL *et al.*, 1976).

2.6.2 – ANÁLISE DE VIABILIDADE DO AGENTE DE FERMENTAÇÃO

Em estudos relacionados com a separação de microrganismos, a determinação da concentração e porcentagem de viabilidade de células devem ser determinadas com precisão e exatidão. A contagem de células de leveduras viáveis pode ser feita de modo direto ou indireto. O método direto faz uso do microscópio, sendo o mais usado rotineiramente no controle das 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 levedura originária da célula em processo. No caso do plaqueamento apenas as células vivas são contadas (ANDRIETTA; ANDRIETTA, 2000).

2.7 – TRABALHOS REPORTADOS NA LITERATURA SOBRE O USO DE HIDROCICLONES NA SEPARAÇÃO DE MICRORGANISMOS

YUAN *et al* (1996) realizaram estudos com quatro diferentes geometrias de hidrociclones: o primeiro, com geometria Mozley, o segundo, do tipo Dorr-Clone, ambos com $D_c = 10$ mm, o terceiro e quarto equipamentos, inicialmente desenvolvidos para a separação líquido-líquido modelos HY1 com $D_c = 11$ mm e 15NS4PT com $D_c = 15$ mm. Os materiais particulados estudados foram *Saccharomyces cerevisiae* com densidade de 1,13 g/mL e diâmetro médio de aproximadamente 4,5 μ m e um fermento de cerveja com diâmetro médio

na faixa 8 μm e densidade de 1,07 g/mL. Para os hidrociclones de separação líquido-líquido, a queda de pressão utilizada foi de 4,1 bar, a uma concentração de 0,4% (peso) de fermento e razão de líquido, R_L igual a 65% (HY1) e 55% (15NS4PT). Para os hidrociclones de separação sólido-líquido, a queda de pressão usada, foi de 6 e 4,8 bar e razão de líquido, R_L igual a 6 % (Mozley) e 10% (Dorr-Clone). A viabilidade celular foi avaliada com o corante azul de tripano antes da análise microscópica. A eficiência total de separação foi avaliada com base na concentração de células no *overflow*, pela concentração de células na alimentação. Neste estudo desenvolvido, os autores obtiveram os seguintes resultados:

- i. Os hidrociclones de separação líquido-líquido analisados (HY1 e 15NS4PT) apresentaram maior eficiência de separação quando comparados aos hidrociclones comerciais (Mozley e Dorr-Clone);
- ii. Todos os hidrociclones avaliados apresentaram maiores eficiências para pressões de operação mais elevadas;
- iii. Avaliando o efeito da concentração, os autores observaram que a redução da concentração de células na alimentação provocava um aumento na eficiência de separação;
- iv. Avaliando o efeito da mudança de temperatura (de 10 °C para 17 °C) no hidrociclone HY1, na separação do fermento de cerveja, observaram maiores eficiências para a temperatura mais alta.

CILLIERS; HARRISON (1997 a) realizaram estudos com hidrociclone comercial Mozley ($D_c = 10\text{mm}$) a uma queda de pressão constante de 700 kPa e diferentes configurações de diâmetros do *underflow* e do *overflow*, operando individualmente ou com dois estágios em série. Para operação em dois estágios em série, o segundo hidrociclone tratava a corrente *overflow* do primeiro estágio. A performance do hidrociclone foi avaliada em termos de vazão volumétrica, vazão mássica e atividade bacteriana (avaliada em termos de taxa de consumo de oxigênio, $-r_{O_2}$). A alimentação consistia em uma suspensão de bactérias biologicamente lixiviada a 4% em massa, sendo que o diâmetro do material particulado estava na faixa de 6 a 22 μm . Os principais resultados obtidos por CILLIERS; HARRISON (1997 a) encontram-se destacados a seguir:

- i. As maiores concentrações mássicas e atividades bacterianas foram alcançadas quando os hidrociclones operaram com diâmetro de corte na faixa de 6 a 20 μm .

Tal diâmetro de corte foi alcançado com hidrociclones operando em dois estágios em série;

- ii. Foi observada uma relação diretamente proporcional entre a recuperação de massa no *underflow* e a atividade bacteriana dessa corrente;
- iii. A partir dos resultados obtidos os autores observaram que o diâmetro do *underflow* pode exercer um papel mais relevante em mini-hidrociclones do que resultados anteriores alcançados em ciclones de diâmetros maiores.

CILLIERS; HARRISON (1997 b) utilizaram um hidrociclone comercial Mozley ($D_c = 10$ mm) para separar uma suspensão de *Saccharomyces cerevisiae* (creme de fermento, cuja densidade variava entre 1072,5 a 1095,2 kg/m³) a uma concentração da alimentação de 18 g/L, queda de pressão de 700 kPa e a temperatura constante de 21 °C. O diâmetro médio do particulado situava-se na faixa de 4,5 e 5,5 µm. A performance do hidrociclone foi avaliada com base em dois valores: A recuperação de sólidos no *underflow* (R) e a razão entre a concentração de leveduras no *underflow* e na alimentação, C. Para isso avaliaram a influência da variação da queda de pressão, concentração da alimentação, temperatura e da geometria do separador na eficiência de separação em hidrociclones. A viabilidade celular não foi investigada neste estudo.

- i. Observaram que o aumento na pressão de operação provocou aumento na recuperação de sólidos, R e na razão de concentração, C;
- ii. Aumentando a concentração de alimentação observaram uma queda em R e C;
- iii. O aumento da temperatura provocou aumento em R e C. Comparando os diferentes dados de concentração, observaram uma interação entre a temperatura e a concentração de alimentação. O efeito positivo obtido com o aumento da temperatura foi de certa forma compensado (reduzido) com a elevação da concentração da alimentação;
- iv. Aumentando o diâmetro do *underflow* de 1 para 1,5 mm a capacidade do hidrociclone subiu de 34 para 45 mL/s a 700 kPa a 21 °C e uma concentração de alimentação constante de 18 g/L.
- v. Observaram que a recuperação de células de *Saccharomyces cerevisiae* no *underflow* do equipamento era função da queda de pressão, da temperatura e da concentração da suspensão de alimentação.

MATTA; MEDRONHO (2000) realizaram estudos de separação empregando a seguinte sequência: fermentação, separação do mosto fermentado em filtros a 2 bar e separação do filtrado em hidrociclones de geometria Bradley e Rietema, ambos com $D_c = 30$ mm, operando a uma queda de pressão de 1 a 3,1 bar. Realizaram também, estudos de separação do fermento (levedura *Saccharomyces cerevisiae*) em água, utilizando um hidrociclone de geometria Bradley, com D_u de 2 e 4 mm e uma queda de pressão de 1,4 bar. Os principais resultados obtidos por MATTA; MEDRONHO (2000) encontram-se destacados a seguir:

- i. Como a densidade do fermento é muito próxima a da água, os autores não esperavam obter valores elevados para a eficiência total de separação. Obtiveram eficiência total entre 7,0 e 31,1% para hidrociclone Bradley com $D_u = 2$ e 4 mm respectivamente;
- ii. No estudo de separação do filtrado em hidrociclones, MATTA; MEDRONHO obtiveram eficiência total reduzida, E'_T entre 87 e 93% para hidrociclone Bradley e eficiência total, E_T entre 90 e 95% para hidrociclone Rietema;
- iii. Para uma dada concentração de alimentação, os autores observaram que o incremento do valor do diâmetro de D_u provocava uma elevação nas eficiências totais reduzidas;
- iv. Para um dado valor de D_u foi obtida uma maior eficiência total para uma menor concentração de alimentação;
- v. Observaram que o hidrociclone Rietema apresenta eficiências inferiores quando comparado ao hidrociclone Bradley sob as mesmas condições operacionais;
- vi. Maiores quedas de pressão geraram maiores eficiências totais;
- vii. A viabilidade celular diminuiu cerca de 4,7% na separação, quando comparada com a viabilidade celular na alimentação do equipamento.

LUBBERSTEDT *et al* (2003) utilizaram o modelo de grupos adimensionais de (CASTILHO; MEDRONHO, 2000) e confrontaram os resultados com os valores oriundos da simulação numérica. Na simulação numérica, os autores utilizaram o código computacional Fluent 5 para avaliar a possibilidade de separação de células em hidrociclones de geometria Bradley ($D_c = 10$ mm) e Dorr-Oliver ($D_c = 10$ mm). Os materiais particulados usados neste trabalho foram células de *Saccharomyces cerevisiae* ($\rho_p = 1,13$ g/cm³), *Escherichia coli* (ρ_p

=1,05 g/cm³), e a célula animal BHK-21 (*Baby Hamster Kidney Cell*), ($\rho_p = 1,06 \text{ g/cm}^3$). O meio de cultivo foi mantido à temperatura de 20 °C e 1% (volume) e a queda de pressão variou entre 100 e 360 kPa, à exceção da célula BHK-21, onde se adotou condições reais de cultivo. O estudo da viabilidade celular foi realizado pelo método azul de tripano. Como resultados dos testes experimentais obtiveram:

- i. Eficiências totais de separação iguais a 78 e 94% ao empregar-se um hidrociclone Dorr-Oliver e dois em série, respectivamente, como resultados dos testes experimentais.
- ii. Eficiência total de separação de 46 e 20% para as células de *Saccharomyces cerevisiae* e *Escherichia coli*, respectivamente, quando utilizado hidrociclone Bradley.
- iii. Eficiência total de separação para a célula BHK-21 de 94% pelo modelo de grupos adimensionais e 90% através da fluidodinâmica computacional, quando utilizado hidrociclone Bradley.
- iv. A viabilidade celular manteve-se praticamente constante para quedas de pressão de 300 kPa.

MEDRONHO *et al* (2005a) usaram fluidodinâmica computacional (CFD) para prever a eficiência de separação de células em hidrociclone que seguia as proporções geométricas recomendadas por Bradley ($D_c = 10\text{mm}$), para a separação de células em água a 20 °C a uma queda de pressão de 2,1 bar. Os particulados usados foram células de *Saccharomyces cerevisiae* ($\rho_p = 1,13 \text{ g/cm}^3$), *Escherichia coli* ($\rho_p = 1,05 \text{ g/cm}^3$), e a célula animal BHK-21 (*Baby Hamster Kidney Cell*), ($\rho_p = 1,06 \text{ g/cm}^3$). Os principais resultados obtidos por MEDRONHO *et al* (2005) estão a seguir:

- i. Eficiência total de separação de 90% e eficiência total reduzida de 87% para a célula BHK-21.
- ii. Eficiência total de separação de 46% e eficiência total reduzida de 28% para *Saccharomyces cerevisiae*.
- iii. Eficiência total de separação de 25% e eficiência total reduzida de 4% para *Escherichia coli*.
- iv. A viabilidade celular não foi mencionada neste artigo.

MEDRONHO *et al* (2005b) utilizaram como material particulado às células CHO.K1 (*Chinese Hamster Ovary*), cultivadas em meio contendo 1% de soro fetal bovino. Já os hidrociclones utilizados neste trabalho foram especialmente desenvolvidos para gerarem altas eficiências de retenção celular. Os equipamentos empregados possuíam dupla entrada tangencial e também a possibilidade de escolha de dois diâmetros do *underflow* (0,20 cm e 0,30 cm) e três diâmetros do *overflow* (0,10 cm, 0,15 cm e 0,20 cm). Através da combinação dos diâmetros dos orifícios (*underflow* e *overflow*), seis diferentes geometrias de hidrociclones puderam ser obtidas.

A alimentação dos hidrociclones foi efetuada através da pressurização do tanque de ar comprimido e os hidrociclones foram operados a quedas de pressão de 1, 2 e 3 bar. A eficiência de separação foi obtida com a fração de células (em número) recuperada no *underflow*. A viabilidade celular foi determinada pelo método de exclusão do corante azul de tripano para a determinação de células vivas em relação à população total. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- i. A maioria das geometrias utilizadas resultaram em eficiências totais de separação superiores a 97%, com exceção do hidrociclone de configuração ($D_o = 0,10$ cm e $D_u = 0,30$ cm que apresentou razão de líquido, R_L de 100% indicando que esta configuração é inadequada para efetuar qualquer tipo de separação.
- ii. As maiores perdas de viabilidades celulares, definidas como a diferença entre as viabilidades obtidas na corrente de alimentação e na corrente do *underflow* do hidrociclone foram de 17,8 e 14,4%, sendo que a maioria manteve-se na faixa de 2,9 a 5,8%.

Na Tabela observa-se um resumo dos principais resultados obtidos na literatura. Verifica-se nesta tabela que o hidrociclone de geometria Bradley apresenta maior eficiência total quando comparado ao hidrociclone de geometria Mozley de mesmo diâmetro, porém apresentou menor eficiência total reduzida quando comparado aos hidrociclones de geometria Mozley e Dorr-Clone.

O diâmetro do *overflow*, do *underflow*, a queda de pressão e a vazão da suspensão de alimentação também influenciaram os resultados de eficiência total e reduzida. Os resultados obtidos no trabalho de MEDRONHO *et al* (2005a) foram obtidos por simulação numérica, enquanto que os demais resultados (Cilliers; Harrison, 1997b) e (Yuan *et al*, 1996a e b) foram obtidos experimentalmente.

Tabela 2.5 – Comparação entre resultados encontrados na literatura (MEDRONHO *et al*, 2005a).

Hidrociclone	Medronho <i>et al</i> (2005a)	Cilliers e Harrison (1997b)	Cilliers e Harrison (1997b)	Yuan <i>et al.</i> (1996b)	Yuan <i>et al.</i> (1996a)
	Bradley	Mozley	Mozley	Mozley e Dorr-Clone	Mozley e Dorr-Clone
D_c (mm)	10	10	10	10	10
$-\Delta P$ (bar)	2,1	6,6	1 – 9	4	6 e 4,8
E_T (%)	28 e 46	22 – 38	18 – 33	—	—
E'_T (%)	4 e 28	—	—	10 – 38 e 10 – 15	36 e 13

2.8 – O EFEITO FISH HOOK

Na separação em hidrociclones é necessário obter a curva de eficiência granulométrica em função do diâmetro do material particulado. Normalmente esta curva decresce monotonicamente com a diminuição do tamanho do particulado e é assintótica para um dado valor da razão de líquido (R_L). Desta forma a eficiência granulométrica para partículas muito finas não é zero e sim igual a razão de líquido. Se a curva de eficiência granulométrica que foi determinada experimentalmente for monotônica, então $G(d)$ pode ser corrigida assintoticamente para permitir que partículas muito finas tenham eficiência $G'(d)$ igual a zero, conforme descrita na Equação (2.13).

Nos estudos envolvendo pequenos ciclones destinados à separação de partículas muito finas, observou-se que a curva de eficiência granulométrica exibe um formato anômalo denominado de *fish hook* (FINCH, 1983). Este fenômeno tem recebido bastante atenção desde o uso de analisadores de partículas baseados na difração de luz laser, uma vez que esses instrumentos apresentam maior precisão na análise da distribuição granulométrica de partículas mais finas.

Usualmente observa-se a presença do efeito *fish hook* em separadores quando utilizados para separar ou classificar partículas mais finas. NAGESWARARAO (2000) em seu estudo sobre este efeito na classificação em hidrociclones, relata que o efeito é esporádico

e randômico, mesmo sob condições idênticas de operação e que a precisão da medição da eficiência não tem sido considerada nos trabalhos onde o *fish hook* é reportado.

Na Figura 2.8 observa-se um gráfico ilustrativo mostrando a curva do efeito fish hook, juntamente com a curva de eficiência granulométrica e granulométrica reduzida.

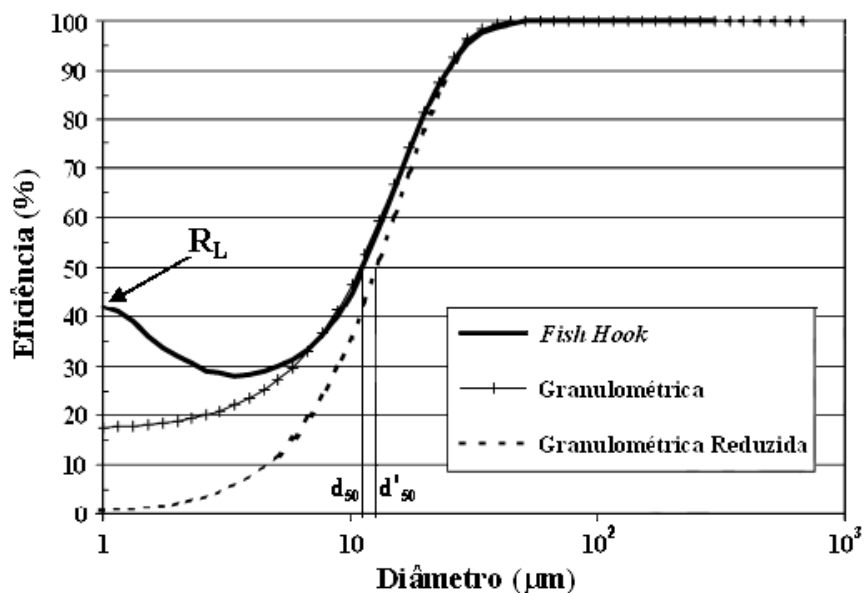


Figura 2.8 – Curva de eficiência granulométrica, granulométrica reduzida e *fish hook*.

Nos estudos de KRAIPECH *et al* (2002) o efeito *fish hook* foi observado na separação em hidrociclones para partículas com diâmetro a partir de 2,6 μm . Foi avaliado neste estudo o efeito da queda de pressão, da concentração de alimentação, do diâmetro do orifício do *overflow* e do *underflow* na curva do *fish hook* e concluíram que o efeito da queda de pressão na curva do *fish hook* foi menos significativo do que o efeito da concentração da alimentação e do diâmetro dos orifícios de saída (*underflow* e *overflow*).

CAPITULO 3

MATERIAIS E METODOS

3.1 – HIDROCICLONES UTILIZADOS

Para analisar a eficiência de separação de leveduras foram efetuados experimentos utilizando os seguintes hidrociclones:

- Hidrociclones Bradley com diâmetro da parte cilíndrica igual a 10, 20 e 30 mm, confeccionados em aço inoxidável (Figura 3.1);
- Hidrociclone modular AKW com diâmetro da parte cilíndrica igual a 10 mm, confeccionado em poliuretano (Figura 3.2);
- Hidrociclone Krebs com diâmetro da parte cilíndrica igual a ½ in, confeccionado em poliuretano (Figura 3.3).



Figura 3.1 – Hidrociclones Bradley com $D_c = 10, 20$ e 30 mm, respectivamente.



Figura 3.2 – Hidrociclone AKW com $D_c = 10$ mm.



Figura 3.3 – Hidrociclone Krebs com $D_c = \frac{1}{2}$ in.

As principais dimensões características de cada hidrociclone utilizado nesse trabalho, com exceção do tipo Krebs, estão apresentadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Dimensões dos hidrociclones estudados.

Dimensão	Hidrociclone			
	Bradley 1	Bradley 2	Bradley 3	AKW
D_c (mm)	10,0	20,0	30,0	10,0
D_i (mm)	1,3	2,7	4,0	4,0
D_o (mm)	2,0	4,0	6,0	2,0
D_u (mm)	1,5	3,0	4,5	2,0
ℓ (mm)	3,3	6,6	9,9	—
L (mm)	68,5	137,0	205,5	—
θ (°)	9,0	9,0	9,0	—

3.2 – UNIDADE EXPERIMENTAL

A fim de avaliar a eficiência de separação de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) em hidrociclones de pequeno diâmetro, foi construída a unidade experimental ilustrada na Figura 3.4:

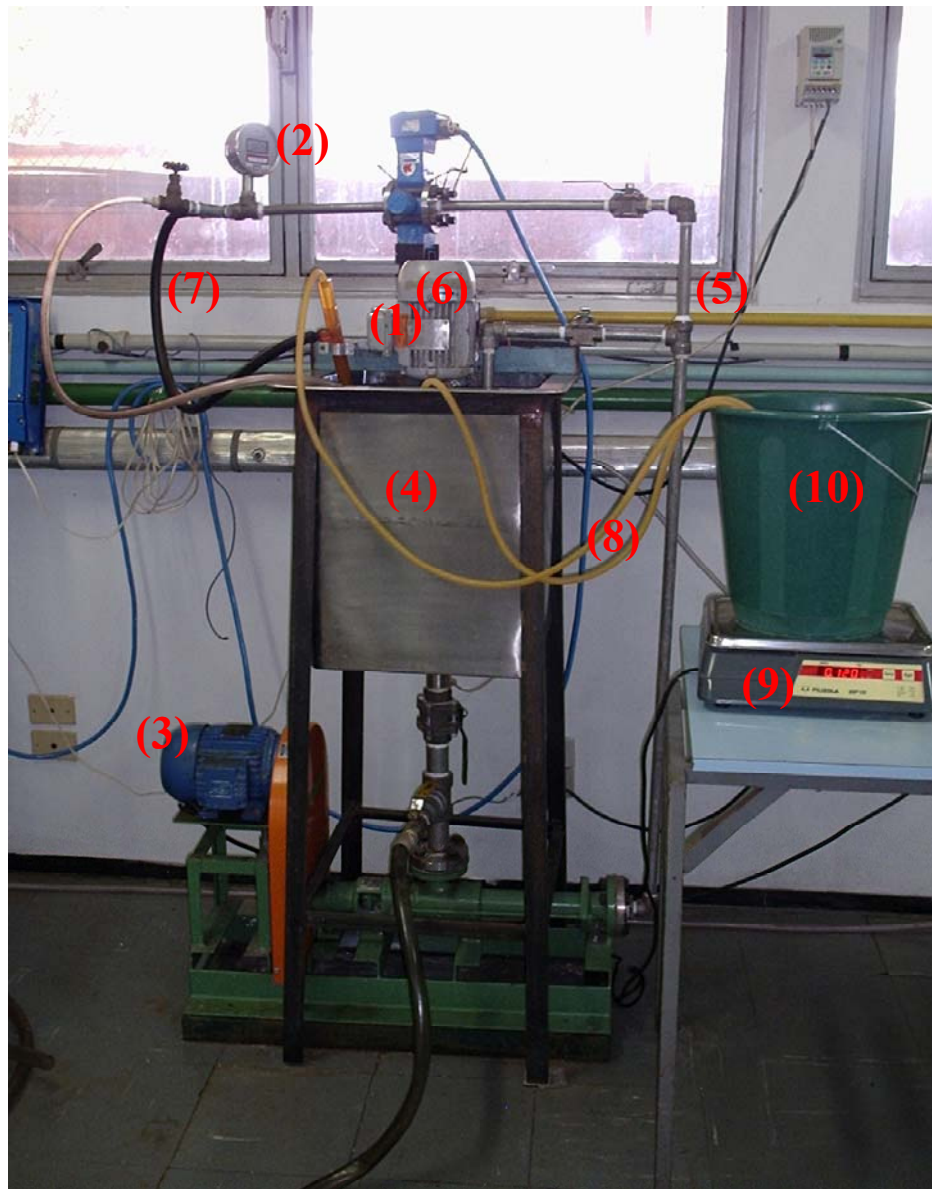


Figura 3.4 – Unidade experimental.

Os principais componentes dessa unidade encontram-se listados a seguir:

1. Hidrociclone (os modelos de hidrociclones estudados e suas respectivas dimensões estão representados na Tabela 3.1);

2. Manômetro digital da marca Hearder, modelo GULpress 1000, que possui faixa de operação de 0 a 8,0 atm;
3. Bomba helicoidal de deslocamento positivo de 1,5 CV da marca Weatherford, série HF/HX para pressões de até 8,00 atm e vazões de até 300 L/h;
4. Tanque de alimentação em aço inoxidável, com chicanas (melhor homogeneização da mistura), Figura (3.5);
5. Tubos e conexões em aço inox, com diâmetro de $\frac{1}{2}$ in entre a bomba e o manômetro digital, tubos e conexões em aço inox de $1 \frac{1}{4}$ in entre o tanque de alimentação e a bomba;
6. Agitador mecânico do tipo pás planas de 0,5 CV acoplado a um variador de voltagem para controle da velocidade de rotação, Figura (3.6);
7. Mangueira de alta pressão Gates do Brasil 10B DI $\frac{1}{2}$ in (12,7 atm) 200 psi, para a alimentação do hidrociclone;
8. Mangueiras de silicone para o transporte das correntes de *overflow* e *underflow*;
9. Balança Filizola modelo BP15 para até 15,0 Kg
10. Balde com capacidade de 20 L.

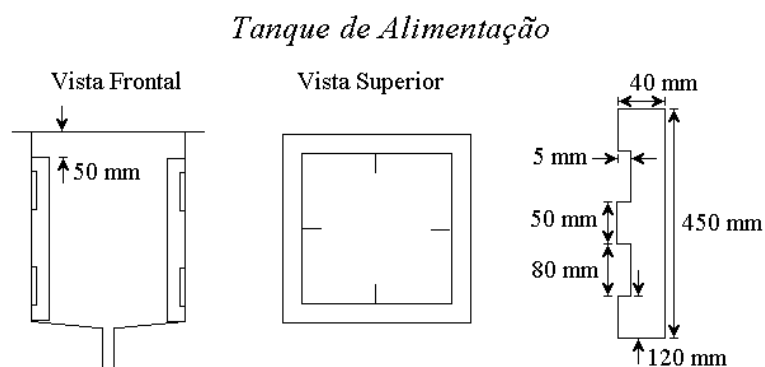


Figura 3.5 – Esquema tanque de alimentação com chicanas.

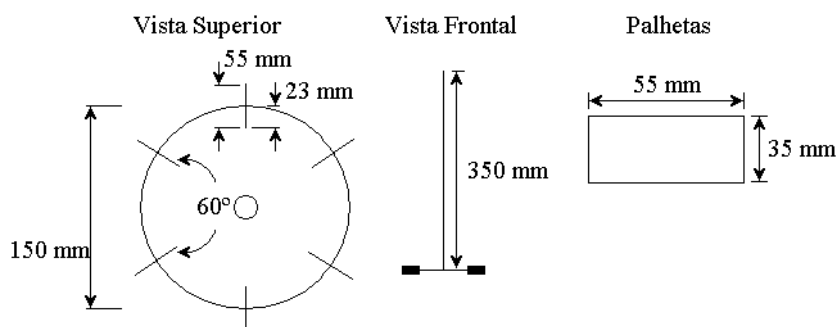


Figura 3.6 – Palhetas do agitador mecânico utilizado.

3.3 – MATERIAL PARTICULADO UTILIZADO

O material particulado empregado nos experimentos foi uma cepa comercial da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, da marca Mauri (Mauri Ind. E Imp. Ltda – Pederneiras, SP), comprada em supermercados. A densidade fornecida pelo fabricante é de 1,10 g/cm³. Este microrganismo foi usado em todos os testes realizados nos hidrociclones.

3.4– METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.4.1 – PREPARO DA SUSPENSÃO

Para a análise dos parâmetros operacionais no desempenho dos hidrociclones, foi realizado um conjunto de experimentos utilizando suspensão da levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) a 0,25% em massa. Esta concentração foi escolhida com base em alguns trabalhos reportados na literatura, como por exemplo, YUAN *et al*, (1996); CILLIERS; HARRISON (1997) e MATTA; MEDRONHO (2000), os quais relatam que maiores eficiências de separação foram obtidas para menores concentrações de alimentação.

A água empregada no preparo da solução foi coletada diretamente da torneira de abastecimento de água da Faculdade de Engenharia Química - FEQUI, sem nenhum tratamento prévio ou posterior. Realizou-se também experimentos de separação do mosto fermentado que será discutido mais adiante neste capítulo.

3.4.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As corridas experimentais foram conduzidas na unidade mostrada na Figura 3.4 e a metodologia utilizada para a coleta de dados experimentais para o estudo de hidrociclones individuais foi a seguinte:

1. Quarenta litros da suspensão eram adicionados ao tanque de alimentação. A partir daí, acionava-se o agitador e aguardavam-se vinte e cinco minutos para que a suspensão estivesse completamente homogeneizada. O sistema de agitação permanecia em funcionamento durante todo o ensaio;
2. ligava-se a bomba helicoidal e, através de válvulas, ajustava-se o valor da queda de pressão desejada no hidrociclone. Para cada um dos hidrociclones testados operou-se

com três quedas de pressão diferentes (2, 4 e 6 atm) estabelecidas considerando-se a capacidade disponível da bomba;

3. aguardava-se até que a unidade entrasse em estado estacionário;
4. registrava-se a temperatura da suspensão no tanque agitado para a posterior determinação das propriedades físicas do fluido (viscosidade);
5. efetuava-se coletas das correntes de *overflow*, *underflow* em determinados períodos de tempo (10 ou 15 segundos) para a determinação das vazões mássicas das mesmas, pesando-as logo em seguida. Para isso, eram efetuadas cinco coletas para cada corrente e depois era calculada a média entre os valores, com a finalidade de obter maior confiabilidade dos resultados, e este valor era considerado como sendo a vazão da corrente para a pressão em análise. Assim, determinava-se as vazões do *overflow* e do *underflow* e, por balanço de massa, calculava-se a vazão de alimentação do equipamento através da soma das duas correntes:

$$W = W_o + W_u \quad (3.1)$$

onde W é a vazão mássica e os índices “a”, “o” e “u” referem-se às correntes de alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente;

6. eram retiradas amostras das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow* para as análises de concentração mássica, análise granulométrica e viabilidade celular;
7. para um determinado hidrociclone e condição de pressão, realizava-se duas corridas sob as mesmas condições operacionais, para a verificação da reprodutibilidade dos resultados;
8. variava-se a pressão e posteriormente, mudava-se o hidrociclone, variando-se novamente a pressão e assim sucessivamente até completar as combinações possíveis entre os hidrociclones estudados e as pressões utilizadas. Foram utilizados um total de 26 experimentos para os quatro (4) hidrociclones estudados a três diferentes quedas de pressão e um hidrociclone estudado à 2 atm.

Realizou-se também, testes com **hidrociclones em série**, procurando-se obter maior eficiência total de separação:

1. após a realização de todo o procedimento experimental, para hidrociclones individuais, as correntes de *underflow* e *overflow* eram separadas em recipientes distintos até que o tanque de alimentação fosse totalmente esvaziado;
2. a corrente do *underflow* era totalmente descartada, enquanto que a corrente do *overflow* era recolhida para posterior separação;
3. quando o tanque de alimentação ficava vazio, ele era limpo e transferia-se para ele toda a corrente de *overflow* que havia sido coletada na etapa anterior;
4. ligava-se normalmente o sistema de agitação e ajustava-se a pressão desejada e novamente eram recolhidas amostras das correntes do *underflow*, *overflow* e alimentação para a determinação da vazão mássica, concentração mássica, análise granulométrica e viabilidade celular.

A Figura 3.7 mostra, de forma esquemática, o procedimento utilizado na realização do teste.

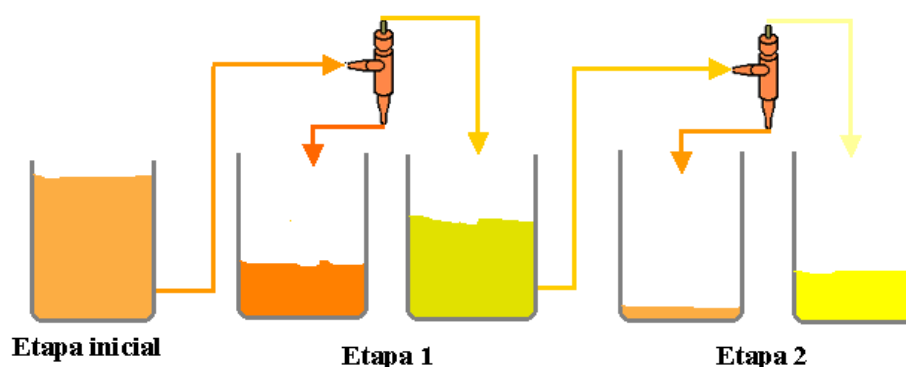


Figura 3.7 – Procedimento esquemático para a simulação da operação de hidrociclones em série.

3.4.2.1 – CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO MÁSSICA

O procedimento usado para o cálculo da concentração mássica foi o seguinte:

1. béqueres eram colocados na estufa por aproximadamente uma hora para que toda a umidade presente fosse retirada;
2. em seguida, estes béqueres eram colocados em um dessecador para que atingissem a temperatura ambiente sem ganhar umidade;
3. cada béquer era pesado em uma balança analítica (M_b);
4. as amostras das correntes de alimentação, *underflow* e *overflow* eram coletadas nos béqueres e em seguida pesadas (M_{b+sp});

5. os béqueres com as amostras eram levados a estufa a aproximadamente 90°C por 10 horas para a retirada de toda a água;
6. as amostras secas eram colocadas no dessecador para que atingissem o equilíbrio térmico;
7. os béqueres com o sólido eram pesados (M_{b+p}), determinando-se através das Equações (3.2), (3.3) e (3.4) a massa de sólidos para cada amostra e conseqüentemente a concentração mássica da mesma.

$$M_{sp} = M_{b+sp} - M_b \quad (3.2)$$

$$M_p = M_{b+p} - M_b \quad (3.3)$$

$$c_w = \frac{M_p}{M_{sp}} \quad (3.4)$$

3.4.2.2 – DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As análises granulométricas foram conduzidas no MasterSizer[®] MicroPlus MAF 5001, para partículas de tamanho entre 0,05 a 550 μm .

Nessas análises no MasterSizer[®] a velocidade de rotação utilizada foi de 2800 rpm, para garantir uma boa homogeneização da amostra. A intensidade do banho ultra-sônico foi de 10 por 30 segundos para promover a quebra dos aglomerados ainda existentes.

O modelo utilizado para descrever a distribuição granulométrica do particulado foi o proposto por Rosin-Rammler-Bennet (RRB), já apresentado na Equação (2.29).

$$X(d_p) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d^*} \right)^n \right] \quad (2.29)$$

Optou-se por escolher esse modelo considerando que os resultados estatísticos oriundos da regressão para a obtenção dos parâmetros, quadrado do coeficiente de correlação e desvios padrão dos parâmetros, foram mais satisfatórios, quando comparados a outros modelos clássicos de distribuição granulométrica (Tabela 2.4). Os parâmetros do modelo foram estimados através do Software STATISTICA 5[®], utilizando-se da regressão não-linear.

3.4.2.3 – DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE CELULAR

Para a análise da viabilidade das células após o processo de separação em hidrociclones, utilizou-se microscopia. Este método baseia-se na coloração das células de leveduras, para isso, utilizou-se o seguinte procedimento experimental, (ANDRIETTA; ANDRIETTA, 2000):

1. 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;
2. 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;
3. após o preparo do material de trabalho, realizou-se a higienização do local de trabalho e do material para evitar possíveis contaminações;
4. 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;
5. pipetou-se 1 mL da amostra e acondicionou-a em um tubo de ensaio;
6. pipetou-se 1 mL do corante e acrescentou-o ao tubo de ensaio contendo a amostra, homogeneizando bem a mistura;
7. transferiu-se uma alíquota desta mistura para a câmara de Neubauer, retirando o excesso com o auxílio de um papel toalha;
8. colou-se a lamínula sobre a câmara de Neubauer da marca Boeco, com profundidade de 1/10 mm e procedeu-se a observação das células com a ajuda do microscópio Olympus BX41, na objetiva de 40x.
9. 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 3.8 observa-se um esquema simplificado da câmara de Neubauer.
10. eram consideradas todas as células que estavam no interior dos quadrículos e as que estavam até 2/3 para dentro;
11. eram consideradas vivas e contadas 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;

12. para o cálculo da contagem de células viáveis utilizou-se as Equações 3.5 e 3.6 (ANDRIETTA; ANDRIETTA, 2000):

Porcentagem de células viáveis:

$$\text{viabilidade (\%)} = \left(\frac{\text{nº de células vivas}}{\text{nº de células vivas} + \text{nº de células mortas}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Número de células por mL de amostra:

$$\text{número de células} = \frac{\text{nº de células vivas}}{\text{nº de quadrados contados}} \times \text{diluição} \times 2,5 \times 10^{-5} \quad (3.6)$$

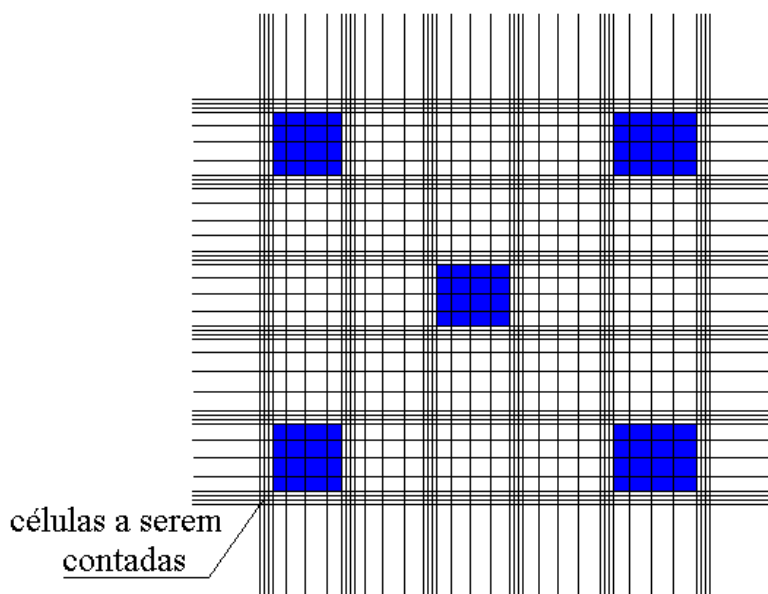


Figura 3.8 – Esquema simplificado da câmara de Neubauer.

3.4.3 – PREPARO DO MOSTO FERMENTADO

Para simular a operação de separação em condições mais próximas da produção industrial de álcool, realizou-se um ensaio de separação do mosto fermentado utilizando apenas o hidrociclone AKW a uma queda de pressão intermediária de 4 atm. Para a obtenção deste mosto fermentado utilizou-se o meio de cultivo apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Meio de cultivo utilizado no preparo do mosto fermentado.

Componente	Concentração (g/L)
Sacarose (açúcar comercial)	50,00
(NH ₄) ₂ HPO ₄	1,20
K ₂ HPO ₄	2,40
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,30
Na ₂ HPO ₄ .7H ₂ O	1,20
Extrato de levedura	3,00

Para a preparação do inóculo (suspensão microbiana) realizou-se o seguinte procedimento experimental:

1. pesou-se 600 g de fermento e adicionou-o a 6 litros de água destilada em um balde de 20 litros, para hidratação à temperatura ambiente por duas horas;
2. após esse tempo (2 horas), a suspensão microbiana era transferida para o tanque, constituindo assim o inóculo para a fermentação e as fermentações eram conduzidas no tanque de alimentação mostrado Figura 3.4;
3. o volume do meio em fermentação era sempre de 20 litros, sendo 6 litros do inóculo e 14 do meio de cultura indicado na Tabela 3.2. O processo fermentativo utilizado foi o descontínuo;
4. as fermentações foram conduzidas a uma temperatura de 29°C, pH igual a 4,5, com agitação mecânica. O pH era monitorado pela leitura em um peagmetro e seu controle era efetuado pela adição de ácido sulfúrico, sendo que o pH devia estar na faixa de 4 e 4,5;
5. o grau Brix do meio era medido no início do processo fermentativo e ao final era medido o grau Brix das correntes de alimentação, *underflow* e *overflow*. Considerava-se como terminada a fermentação, quando o grau Brix destas correntes atingia valores em torno de 1,0°;
6. após o processo de fermentação, eram realizados procedimentos experimentais de separação a 4 atm para o hidrociclone AKW, conforme descritos nos itens (3.4.2.1), (3.4.2.2) e (3.4.2.3).

Para melhor comparar as eficiências de separação em hidrociclones para o fermento em água e o mosto fermentado, realizou-se experimentos com o fermento puro procurando-se

manter as mesmas condições de concentração e temperatura, que as usadas no preparo da fermentação. Desta forma pesou-se 600 g do fermento, diluindo-o em 20 litros de água a uma temperatura de 28 °C, realizando procedimentos experimentais de separação a 4,0 atm para o hidrociclone AKW, conforme descritos nos itens (3.4.2.1), (3.4.2.2) e (3.4.2.3).

3.4.4 – PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DO DIÂMETRO DE CORTE

1. efetuava-se análises granulométricas das amostras da alimentação e do *underflow* coletadas seguindo o procedimento descrito no item 3.4.2.2;
2. de posse dos valores dos parâmetros (n e d^*), do modelo de distribuição granulométrica do tipo RRB, da razão de líquido e da eficiência total, procedia-se a determinação do diâmetro de corte e do diâmetro de corte reduzido para cada condição operacional. Para tal foi utilizada uma rotina (ANEXO 2) desenvolvida no *software* MAPLE 8[®], empregando as Equações (2.12) e (2.15)

$$G(d_{50}) = E_T \frac{dX_u(d_{50})}{dX(d_{50})} = 0,50 \quad (2.12)$$

$$G'(d'_{50}) = \frac{E_T \frac{dX_u(d'_{50})}{dX(d'_{50})} - R_L}{1 - R_L} = 0,50 \quad (2.15)$$

E importante ressaltar que a amostra do *overflow* coletada, apesar de não ser utilizada no cálculo do diâmetro de corte, não retornava para o tanque, e a amostra do *underflow* após realizados os testes também não era retornada ao tanque de modo a evitar alterações indesejáveis na granulometria da corrente de alimentação.

