



Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia de Alimentos  
Departamento de Engenharia de Alimentos



# **CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE HIDROCICLONE PARA TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA**

---

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade  
Estadual de Campinas, para obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

***Vívian Tavares de Andrade***

*Engenheira de Alimentos*

***Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre***

*Orientador*

***Prof. Dr. Mauro de Paula Moreira***

*Co-orientador*

Campinas - SP

2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

An24c Andrade, Vívian Tavares de  
Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para  
tratamento de água residuária / Vivian Tavares de Andrade. –  
Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Ranulfo Monte Alegre  
Co-orientador: Mauro de Paula Moreira  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Hidrociclone. 2. Emulsão de óleo em água. 3.  
Tratamento de efluentes. 4. *Saccharomyces cerevisiae*. 5.  
Meio ambiente. I. Alegre, Ranulfo Monte. II. Moreira, Mauro  
de Paula. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade  
de Engenharia de Alimentos. IV. Título.

(ckn/fea)

Titulo em ingles: Construction and evaluation of hydrocyclones models for  
wastewater treatment

Palavras-chave em inglês (Keywords): Hydrocyclone, Oil in water emulsions,  
Wastewater treatment, *Saccharomyces  
cerevisiae*, Environment

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Ranulfo Monte Alegre  
Fernando Antônio Cabral  
José Euclides Paterniani  
Jean Carlo Allanis

Programa de Pós-Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

**VÍVIAN TAVARES DE ANDRADE**

**Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água  
residuária**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Aprovada em

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ranulfo Monte Alegre  
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Fernando Antônio Cabral  
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp  
(Membro)

---

Prof. Dr. José Euclides Paterniani  
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp  
(Membro)

---

Prof. Dr. Jean Carlo Allanis  
Fundação Educacional de Barretos - FEB  
(Membro)

*Dedico*  
*aos meus pais **Vanda e Valmir** pela vida,*  
*à minha irmã **Vanessa** pelo apoio,*  
*à minha avó por todo amor,*  
*e ao **Luis** por todo carinho.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus por me conceder uma vida repleta de bênçãos e realizações;*

*À minha família por todo amor, incentivo  
e apoio que sempre me concederam;*

*Ao Luis Buenes pelo carinho e força  
dispensada nos momentos difíceis;*

*À Faculdade de Engenharia de Alimentos/Unicamp especialmente ao Departamento de  
Engenharia de Alimentos pela oportunidade;*

*À CAPES pela concessão da bolsa;*

*Ao Prof. Dr. Ranulfo por ter sido mais do que um orientador, um grande amigo em todos os  
momentos;*

*Ao Prof. Dr. Mauro pela orientação e acima de tudo pela amizade e paciência;*

*Aos professores membros da banca pelas sugestões e contribuições apresentadas;*

*Aos colegas do laboratório de Processos Fermentativos e Tratamento de Resíduos do  
DEA/FEA/UNICAMP pela companhia e ajuda durante a execução do trabalho;*

*À **Jaqueline** pelo auxílio nas análises e discussões durante o experimento;*

*Aos amigos **Fábio, Eveline, Gabriela e Michelle** pela companhia, conversas e momentos de  
descontração;*

*Meus mais sinceros agradecimentos.*

*“A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento” (Platão).*

## RESUMO

Neste trabalho foram construídos cinco tipos de hidrociclones, seguindo as geometrias recomendadas por Rietema (1961) e Bradley (1965), para avaliação da eficiência de separação de óleo emulsionado em água. O objetivo foi maximizar a eficiência do hidrociclone como pré-depurador de águas residuárias. Emulsões de óleo em água e soluções com partículas de carvão e *Saccharomyces cerevisiae* foram mantidas num tanque de alimentação com agitador mecânico, para completa homogeneização das emulsões e suspensões. Os hidrociclones foram alimentados por meio de uma bomba centrífuga. Um dos hidrociclones tinha uma parte cônica no topo, sem a presença do tubo inserido na parte cilíndrica (CM<sub>1</sub>). Em um segundo modelo (CM<sub>2</sub>) foi introduzido uma rosca sem fim com onze passos, na parte cilíndrica do hidrociclone para aumentar o tempo de residência das partículas no campo centrífugo. O hidrociclone (CM<sub>3</sub>) foi diferenciado do CM<sub>2</sub> pela inserção de um tubo cilíndrico na parte central. O hidrociclone (CM<sub>4</sub>) foi diferenciado do modelo de Bradley pela inserção de uma rosca sem fim. Também foi construído um hidrociclone modelo de Bradley para fins de comparação. Amostras foram coletadas na alimentação, underflow e overflow para posterior determinação da concentração de óleo emulsionado em água. O método de DQO, conforme descrito no Standard Methods, foi usado na determinação da concentração de óleo, usando uma curva padrão. A eficiência global do hidrociclone de Bradley foi maior que dos modelos CM<sub>1</sub> e CM<sub>2</sub>, entretanto a eficiência global de separação desses hidrociclones operando sob condições de reciclo foi significativamente maior que em modo contínuo. O hidrociclone CM<sub>2</sub> apresentou maior eficiência que o modelo CM<sub>1</sub>. O hidrociclone CM<sub>3</sub> não apresentou diferença significativa de eficiência global em relação ao modelo tradicional de Bradley, apresentando eficiência global semelhante à do hidrociclone CM<sub>2</sub> operando em sistema de reciclo, portanto em relação ao CM<sub>2</sub>, o hidrociclone CM<sub>3</sub> foi um pouco

mais eficiente. A eficiência global do hidrociclone CM<sub>4</sub> foi semelhante à apresentada pelo hidrociclone de Bradley. Os hidrociclones estudados não foram eficientes para a concentração de células de *Saccharomyces cerevisiae* e nem na separação de finas partículas de carvão.

**Palavras Chave:** Hidrociclone. Emulsão de óleo em água. Tratamento de efluentes. *Saccharomyces cerevisiae*. Meio Ambiente.

## ABSTRACT

In this work five different hydrocyclones were constructed based on geometry recommended by Rietema (1961) and Bradley (1965), for evaluation of the efficiency to separate emulsified oil from water. Its aim was to maximize the hydrocyclone efficiency as wastewater pre-depurator. Oil-in-water emulsions and solutions with particles of coal and *Saccharomyces cerevisiae* in water were maintained in a agitate tank to ensure the complete homogenization of the emulsions and solutions. The hydrocyclones were feed through a centrifugal pump. One of the hydrocyclones has two conical parts and one cylindrical part (CM<sub>1</sub>). In a second model a static screw with eleven threads was inserted in the cylindrical part of the hydrocyclone to increase the course of the particles in the centrifugal field (CM<sub>2</sub>). The hydrocyclone (CM<sub>3</sub>) was differentiated of CM<sub>2</sub> for the insertion of a tube in its central part. The hydrocyclone (CM<sub>4</sub>) was constructed from Bradley model hydrocyclone for the insertion of a static screw with six threads. Also it was constructed a Bradley model for ends of comparisons. Samples of the water-oil emulsion were collected at the feed, underflow and overflow to determined the oil concentration. The COD test, as recommended by Standard Methods, was used to determine the oil concentration, after the sample dilution. The overall efficiency of separation oil of the Bradley model hydrocyclone was better than the hydrocyclones CM<sub>1</sub> and CM<sub>2</sub>, therefore the overall efficiency of separation of these hydrocyclones operating in recycle was significantly higher than without recycle, under same operating conditions. The CM<sub>2</sub> model had overall efficiency higher than the CM<sub>1</sub> model. No higher significant difference was found with the increase of the power pump, as well as no higher significant difference of overall efficiency was found between CM<sub>3</sub> and Bradley model

hydrocyclones. The hydrocyclones studied cannot efficiently separate *Saccharomyces cerevisiae* or coal powder from water with high efficiencies.

**Keywords:** Hydrocyclone. Oil-in-water emulsions. Wastewater treatment. *Saccharomyces cerevisiae*. Environment.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	3
2.1 Tratamento de águas residuárias	3
2.1.1 Águas residuárias	3
2.1.2 Tratamento de águas residuárias	4
2.1.2.1 Tratamento Preliminar	4
2.1.2.2 Tratamento Primário	5
2.1.2.3 Tratamento Secundário	5
2.1.2.4 Tratamento Terciário	7
2.2 Hidrociclones	7
2.3 Mecanismos de separação no hidrociclone	11
2.4 - Equacionamento	16
2.5 - Eficiência de hidrociclone	21
2.6 - Separações centrífugas	25
2.7 - Utilização do hidrociclone para separação de microorganismos	26
<b>3. MATERIAIS E METODOS</b>	28
3.1 - Construção dos modelos de hidrociclones	28
3.2 - Utilização do hidrociclone para concentração de células de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> suspensas em água	36
3.3 - Material de ensaio	36
3.3.1 - Preparo das emulsões e soluções de alimentação sistema	36
3.3.1.1 - Preparo das emulsões de óleo em água	36
3.3.1.2 - Preparo das suspensões de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	37
3.3.1.3 - Preparo das suspensões de carvão vegetal	37
3.4 - Procedimentos experimentais	38
3.4.1 - Determinação da concentração de óleo emulsionado em água.	39
3.4.2 - Determinação da concentração de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	39
3.4.3 - Determinação da concentração de partículas de carvão	39
3.5 - Balanço de massa do sistema	40

3.6 - Análise adimensional do sistema	41
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	45
4.1 - Hidrociclone CM <sub>1</sub>	45
4.2 - Hidrociclone CM <sub>2</sub>	50
4.3 - Hidrociclone CM <sub>3</sub>	55
4.4 - Hidrociclone CM <sub>4</sub>	57
4.5 - Hidrociclone modelo de Bradley	58
4.6 - Utilização de modelos de hidrociclone para concentração de <i>Saccharomyces cerevisia</i> .	61
4.7 - Utilização de modelos de hidrociclone para concentração de partículas de carvão	63
<b>5. CONCLUSÃO</b>	68
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	69

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Esquema do hidrociclone mostrando as principais dimensões	8
<b>Figura 2</b>	Esquema mostrando o escoamento interno no hidrociclone	13
<b>Figura 3</b>	Esquema simplificado mostrando o balanço de massa de um hidrociclone	22
<b>Figura 4</b>	Esquema do ensaio com o hidrociclone mostrando seus principais componentes	28
<b>Figura 5</b>	Esquema do hidrociclone (CM <sub>1</sub> ) mostrando as principais dimensões. D <sub>i</sub> – Diâmetro da abertura de alimentação; D <sub>c</sub> – Diâmetro da parte cilíndrica; D <sub>o</sub> – Diâmetro do overflow; D <sub>u</sub> – Diâmetro do underflow; L – Altura do hidrociclone; L <sub>1</sub> – Altura da seção cilíndrica; $\theta$ - Ângulo do cone	31
<b>Figura 6</b>	Esquema de reciclo da alimentação do hidrociclone (CM <sub>1</sub> ) mostrando seus componentes	32
<b>Figura 7</b>	Esquema do hidrociclone (CM <sub>2</sub> ) mostrando as principais dimensões. D <sub>i</sub> – Diâmetro da abertura de alimentação; D <sub>o</sub> – Diâmetro do overflow; D <sub>u</sub> – Diâmetro do underflow; L – Altura do hidrociclone; L <sub>1</sub> – Comprimento da seção cilíndrica; $\theta$ - Ângulo do cone	33
<b>Figura 8</b>	Esquema do hidrociclone (CM <sub>3</sub> ) mostrando as principais dimensões. D <sub>i</sub> – Diâmetro da abertura de alimentação; D <sub>o</sub> – Diâmetro do overflow; D <sub>u</sub> – Diâmetro do underflow; L – Altura do hidrociclone; L <sub>1</sub> – Comprimento da seção cilíndrica; I – Comprimento do tubo	34
<b>Figura 9</b>	Hidrociclones modelos CM <sub>1</sub> (a) e CM <sub>2</sub> (b) construídos com aço inoxidável 316 L. A rosca sem fim apresentada (b) foi inserida na parte cilíndrica do hidrociclone CM <sub>2</sub>	35

**Figura 10** Histograma com a porcentagem relativa das partículas de carvão com diferentes diâmetros, utilizadas para formar a suspensão de alimentação para os hidrociclones CM<sub>2</sub> e CM<sub>4</sub> 64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Constantes das Eqs. 4 e 6, para as famílias de hidrociclones Rietema, Bradley e cilíndricos	19
<b>Tabela 2</b>	Constantes da Equação 8 para as famílias de hidrociclone de Rietema e Bradley	20
<b>Tabela 3</b>	Proporções geométricas de dois modelos de hidrociclones	20
<b>Tabela 4</b>	Dimensões dos modelos de hidrociclones de Rietema, Bradley, CM <sub>1</sub> , CM <sub>2</sub> , CM <sub>3</sub> e CM <sub>4</sub>	30
<b>Tabela 5</b>	Variáveis envolvidas no processo, seus símbolos e suas dimensões	41
<b>Tabela 6</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM <sub>1</sub> ) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de ½ HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	46
<b>Tabela 7</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM <sub>1</sub> ) operando em reciclo com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de ½ HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ), alimentação ( $Q_a$ ), reciclo ( $Q_r$ ) e fluxo que retorna para bomba ( $Q_b$ )	48
<b>Tabela 8</b>	Esquema do hidrociclone (CM <sub>3</sub> ) mostrando as principais dimensões. $D_i$ – Diâmetro da abertura de alimentação; $D_o$ – Diâmetro do overflow; $D_u$ – Diâmetro do underflow; $L$ – Altura do hidrociclone; $L_1$ – Comprimento da seção cilíndrica; $I$ – Comprimento do tubo	51

<b>Tabela 9</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM <sub>2</sub> ) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	53
<b>Tabela 10</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM <sub>2</sub> ) operando em reciclo com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ), alimentação ( $Q_a$ ), reciclo ( $Q_r$ ) e retorno para bomba ( $Q_b$ )	54
<b>Tabela 11</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM <sub>3</sub> ) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	56
<b>Tabela 12</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM <sub>4</sub> ) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	58

<b>Tabela 13</b>	Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone modelo de Bradley operando com emulsão de óleo em água, alimentado com uma bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	59
<b>Tabela 14</b>	Dados médios da massa de <i>Saccharomyces cerevisia</i> coletada nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A] em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone ( $CM_2$ ) operando com suspensão de <i>Saccharomyces cerevisia</i> em água (1,0 % p/v), alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	62
<b>Tabela 15</b>	Dados médios da massa de partículas de carvão coletada nas amostras das correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone ( $CM_2$ ) operando com suspensão de partículas de carvão em água (1,0 % p/v), alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ )	65
<b>Tabela 16</b>	Dados médios da concentração de carvão, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global $E_T$ e razão de líquido $R_L$ em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone ( $CM_4$ ) operando com suspensão de partículas de carvão em água (1,0 % p/v), alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>[A]</b>	Concentração volumétrica de óleo na alimentação	(ML <sup>-3</sup> )
<b>C<sub>v</sub></b>	Concentração volumétrica na suspensão de alimentação	(ML <sup>-3</sup> )
<b>C<sub>o</sub></b>	Concentração volumétrica na suspensão do overflow	(ML <sup>-3</sup> )
<b>C<sub>u</sub></b>	Concentração volumétrica na suspensão do underflow	(ML <sup>-3</sup> )
<b>D<sub>c</sub></b>	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone	(L)
<b>D<sub>i</sub></b>	Diâmetro do duto de alimentação	(L)
<b>D<sub>o</sub></b>	Diâmetro do duto do overflow	(L)
<b>D<sub>u</sub></b>	Diâmetro do duto de saída do underflow	(L)
<b>d'<sub>50</sub></b>	Diâmetro de corte reduzido	(L)
<b>E<sub>T</sub></b>	Eficiência total	
<b>E<sub>u</sub></b>	Número de Euler baseado no diâmetro do hidrociclone	
<b>F</b>	Fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro na corrente de alimentação	
<b>F<sub>u</sub></b>	Fração mássica das partículas menores que um dado diâmetro na corrente do overflow	
<b>G</b>	Eficiência granulométrica	
<b>L</b>	Comprimento do hidrociclone	(L)
<b>L<sub>1</sub></b>	Comprimento da parte cilíndrica do hidrociclone	(L)
<b>l</b>	Comprimento da reentrância do tubo do overflow	(L)
<b>[O]</b>	Concentração de óleo no overflow	(ML <sup>-3</sup> )
<b>P</b>	Número de passos	
<b>Q</b>	Vazão da suspensão de alimentação	(L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> )
<b>Q<sub>b</sub></b>	Vazão da suspensão que passa pela bomba durante o processo de reciclo	(L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> )
<b>Q<sub>u</sub></b>	Vazão da suspensão coletada no underflow	(L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> )
<b>Q<sub>o</sub></b>	Vazão da suspensão coletada no overflow	(L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> )
<b>Re</b>	Número de Reynolds baseado no diâmetro do hidrociclone	
<b>R<sub>L</sub></b>	Razão de líquido	
<b>Stk<sub>50</sub></b>	Número de Stokes	
<b>[U]</b>	Concentração de óleo no underflow	(ML <sup>-3</sup> )

$V_c$	Velocidade de escoamento da suspensão baseada no diâmetro da parte cilíndrica	$(L T^{-1})$
$X$	Diâmetro da partícula	$(L)$
$W_{s_u}$	Massa total de sólidos coletados no concentrado	$(M T^{-1})$
$W_S$	Massa total de sólidos na alimentação	$(M T^{-1})$
$\Delta P$	Queda de pressão entre as correntes de alimentação e do diluído	$(M L^{-1} T^{-2})$
$\pi$	Razão entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência	
$\mu$	Viscosidade absoluta do fluido	$(M L^{-1} T^{-1})$
$\rho$	Densidade do fluido	$(L M^{-3})$
$\rho_s$	Densidade do sólido	$(L M^{-3})$
$\theta$	Ângulo do cone do hidrociclone	(graus)

## ABREVIACOES

<b>A</b>	Alimentação
<b>O</b>	Overflow
<b>U</b>	Underflow
<b>CM<sub>1</sub></b>	Modelo de hidrociclone com duas partes cnicas e uma cilíndrica
<b>CM<sub>2</sub></b>	Modelo de hidrociclone com inserção de uma rosca sem fim
<b>CM<sub>3</sub></b>	Modelo de hidrociclone diferenciado do CM <sub>2</sub> pela inserção de um tubo cilíndrico na parte central
<b>CM<sub>4</sub></b>	Modelo de hidrociclone diferenciado do modelo tradicional de Bradley pela inserção de uma rosca sem fim

## **1 - INTRODUÇÃO**

Sendo simples, fácil de operar e um efetivo separador sólido-líquido, os hidrociclones tem sido largamente utilizados em indústrias química, metalúrgica e petrolíferas.

O princípio de funcionamento de um hidrociclone é: uma corrente injetada tangencialmente num vaso cilíndrico cria um campo centrífugo e se divide em duas correntes axiais de saída. Uma suspensão concentrada desce da parede em direção à saída do fundo, enquanto o líquido leve sobe pela região central até a saída do topo (Fehr e Cloutier, 1980).

O tamanho do material particulado deve ser entre 1-10  $\mu\text{m}$  de diâmetro, para o hidrociclone ter boa eficiência. Centrífugas e ciclones funcionam com o mesmo princípio de um campo centrífugo ampliado para efeito de separação entre sólidos de diferentes tamanhos ou diferentes líquidos (Cilliers e Harrison, 1997).

Este projeto de pesquisa teve como objetivo a construção e avaliação de protótipos de hidrociclones a partir dos modelos de Rietema (1961) e Bradley (1965), para avaliar a eficiência dos mesmos na separação líquido-líquido e sólido-líquido, com sólidos de pequenos diâmetros, pela variação dos diâmetros (cilíndrico, vortex finder e apex) e/ou pela inserção de uma rosca sem fim, bem ajustada nas partes cilíndricas dos mesmos, buscando obter parâmetros e dimensões para separação de óleo emulsionado de água. Em complemento ao trabalho, alguns modelos desenvolvidos foram testados para separação de células de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) em água e para separação de partículas de carvão em água. Com a alteração dos modelos e dimensões do equipamento, buscou-se aumentar a eficiência do mesmo.

Visou-se obter dados referentes ao uso de hidrociclone para, a partir dos resultados obtidos, utilizá-los na área ambiental na função de um separador de fases como pré-depurador

para redução de parte da carga poluidora, e conseqüentemente, o tempo de tratamento numa Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

A vantagem de utilizar hidrociclones na área industrial é devido ao menor espaço físico que o mesmo utiliza comparado a flotores e decantadores, além de serem equipamentos sem partes móveis, de fácil operação e que exigem apenas bomba centrífuga para sua alimentação, quando a pressão ou energia potencial deste não tem o nível de energia necessário à sua operação. Além disto, o tempo de residência que o líquido permanece no hidrociclone é pequeno, enquanto na separação de fases em outros equipamentos, o tempo de residência é maior. Estes fatos podem tornar o hidrociclone economicamente viável.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Tratamento de águas residuárias

#### 2.1.1 – Águas residuárias

Devido ao impacto ambiental que as águas residuárias podem trazer para o meio ambiente, o seu tratamento, de forma econômica, antes da disposição no solo ou de seu lançamento em cursos d'água, torna-se necessário.

Recentemente tem aumentado a preocupação por parte da legislação ambiental quanto ao descarte de efluentes oleosos em rios e mares. Estas águas provocam um impacto ambiental que varia com a quantidade dos compostos orgânicos presentes de composições e toxidades diferentes. Por isso, o descarte da água oleosa só é permitido depois que a quantidade de óleos e sólidos em suspensão estejam abaixo da concentração máxima estabelecida pela legislação vigente, que varia conforme o país (Couto e Massarani, 2004).

Na Tabela 1, estão apresentados os principais poluentes em águas residuárias e suas características.

**Tabela 1** – Principais poluentes em águas residuárias e suas características.

<b>Categoria de Poluentes</b>	<b>Índices ou substâncias</b>	<b>Indústria (exemplo)</b>	<b>Tratamento (exemplo)</b>
Material orgânico	DBO, DQO	Processamento de alimentos	Tratamento biológico
Micropoluentes orgânicos perigosos	PCB, pesticidas, tricloroetileno	Pesticidas – fábrica, lavagem	Combustão, etc.
Metais pesados	Cd, Pr, Pb	Eletro galvanização	Separação
Ácidos ou álcalis	pH, alcalinidade	Têxteis	Neutralização
Radioatividade	Elementos radioativos	Energia nuclear	Separação
Calor	Temperatura	Usinas de energia	Resfriamento
Inorgânicos	Nutrientes (N, P)	Eletro galvanização, fertilizadores	Tratamento químico
Microrganismos	Vírus, coliforme	Esgoto hospitalar	Esterilização

Fonte: YANG (1996)

Além da preocupação ambiental, existe ainda uma questão econômica relacionada ao reuso da água de produção para utilização em outros fins dentro das indústrias. Neste caso, o reuso da água de produção é geralmente concebido depois de uma etapa secundária como o tratamento biológico, tornando-se assim, mais uma motivação importante por parte destas indústrias para o tratamento de seus efluentes (Couto e Massarani, 2004).

Óleos leves são altamente tóxicos, devido à presença de maiores quantidades de compostos aromáticos, enquanto que óleos pesados e mais densos são pouco tóxicos, porém causam impacto físico de recobrimento de águas. A intensidade do impacto e tempo de recuperação tendem a serem diretamente proporcionais à quantidade de óleo derramado ou presente em um ambiente ou local restrito.

Óleos e graxas presentes em águas residuárias existem em várias formas: livre, dispersa ou em emulsão. A diferença está associada ao tamanho das partículas (droplet size). Em uma mistura de água-óleo, o óleo livre possui partículas maiores que 150  $\mu\text{m}$ ; óleo disperso entre 20 e 150  $\mu\text{m}$  e emulsões menores que 20  $\mu\text{m}$  (Cheryan e Rajagopaln, 1998).

## **2.1.2 – Tratamento de águas residuárias**

Na maioria das vezes, o tratamento de efluentes exige que várias etapas sejam realizadas para que seja obtido um efluente de qualidade que atenda às especificações vigentes para descarga num corpo receptor.

### **2.1.2.1 – Tratamento Preliminar**

É a remoção de constituintes da água residuária que possam causar problemas operacionais e de manutenção nos sistemas de operações do tratamento, de processo e sistemas

auxiliares. Já o pré-tratamento é o condicionamento da água residuária para descarga no sistema de esgotos (Metcalf & Eddy, 1991; Ramalho, 1983).

### **2.1.2.2 – Tratamento Primário**

A seleção de um processo de tratamento ou seqüência de processos depende de um número de fatores. Alguns desses fatores são (Ramalho, 1983):

- Características da água residuária: DBO (demanda bioquímica de oxigênio), percentagem de sólidos suspensos, pH, presença de materiais tóxicos;
- Exigência de qualidade do efluente;
- Custo e disponibilidade de terra;
- Consideração de um possível aumento dos padrões de qualidade de água, necessitando o projeto de um tipo de tratamento mais sofisticado para o futuro.

O tratamento primário de água residuária implica na remoção de uma porção de sólidos suspensos e matéria orgânica, realizada usualmente através de operações físicas como gradeamento e sedimentação (Metcalf e Eddy, 1991; Ramalho, 1983). O efluente do tratamento primário conterá matéria orgânica considerável e terá uma DBO relativamente alta.

### **2.1.2.3 – Tratamento Secundário**

O termo tratamento secundário inclui todos os processos biológicos de tratamento de águas residuárias, incluindo aeróbios e anaeróbios (Ramalho, 1983). Porém, o tratamento biológico se compõe quase que exclusivamente de processos aeróbios, portanto há fenômenos que se verificam na água contendo ar em solução. Os principais tipos de tratamento secundário aeróbio são: lodo ativado, lagoas aeradas e lagoas de estabilização. Já o tratamento anaeróbio é utilizado para águas residuárias bem como para digestão de lodos. Os produtos finais da

degradação de lodos são gases, principalmente metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) (Imhoff, 2002).

O tratamento biológico de esgotos é um fenômeno que pode ocorrer naturalmente no solo ou na água desde que predominem condições apropriadas para evolução, reprodução e crescimento de organismos que decompõem a matéria orgânica. É o que ocorre na disposição de esgotos brutos no solo ou em corpos receptores naturais como lagoas, rios, oceanos, quando não há uma sobrecarga (Campos, 1994).

Na aplicação do tratamento biológico para o tratamento de resíduos, algumas recomendações são importantes (Schiavolin, 2001):

- Não permitir o lançamento de águas residuárias com sólidos dissolvidos ou despejos tóxicos ao sistema de tratamento;
- Corrigir o pH e manter a temperatura ideal para a ação dos microrganismos;
- Dosar substâncias ricas em nutrientes (nitrogênio e fósforo);
- Evitar a entrada de altas cargas orgânicas no sistema de tratamento;
- Manter o lodo biológico em atividade constante.

O tratamento secundário é direcionado principalmente à remoção de orgânicos biodegradáveis e sólidos suspensos (Metcalf & Eddy, 1991). É importante saber que existe grande possibilidade de toda a matéria orgânica presente no efluente ser biodegradável quando há uma baixa relação entre DQO e DBO ( $\frac{DQO}{DBO} < 2$ )\*. A confirmação da biodegradabilidade pode

se dar pelas seguintes situações (Braile e Cavalcanti, 1993):

- O despejo bruto, após envelhecimento, deverá ficar com seu pH reduzido;
- O oxigênio dissolvido (OD), se inicialmente existente, deverá diminuir, podendo desaparecer.

---

\* Se possível DBO<sub>20</sub>, senão DBO<sub>5</sub>.

\*\* Não existe maneira ideal de fixar um quociente único. Os números 2 e 0,8 servem apenas para orientação.

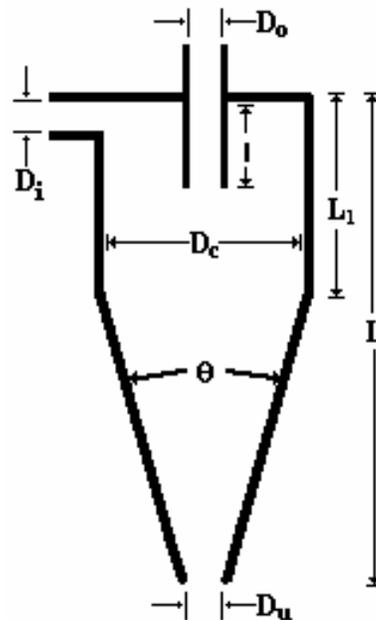
#### **2.1.2.4 – Tratamento Terciário**

O tratamento terciário, também chamado de tratamento avançado de água residuária, consiste de processos que são projetados para alcançar uma qualidade melhor do efluente do que os tratamentos secundários citados anteriormente (Ramalho, 1983). Este tratamento poderá constar da redução adicional de matéria orgânica consumidora de oxigênio, e redução de fósforo ou de nitrogênio (Imhoff, 2002).

#### **2.2 – Hidrociclones**

Delfos et al (2004) relatando trabalhos de outros autores, disseram que os hidrociclones são usados em várias indústrias para separar dois componentes de densidades diferentes com auxílio da força centrífuga criada pelo fluxo rotacional. É comum encontrar hidrociclones de separação de sólido/líquido e sólido/gás em indústria, entretanto, devido à pequena diferença de densidade entre as fases, é menos comum a aplicação de hidrociclone para separação de dois líquidos imiscíveis. Uma exceção é a indústria de óleo em que os hidrociclones são usados para remover o óleo da água produzida antes de ser disposta no mar ou reinjetada na fonte.

O hidrociclone não tem partes móveis e consiste de uma parte cônica ligada a uma parte cilíndrica. A entrada da alimentação é tangencial à porção superior da parte cilíndrica do ciclone. Uma das aberturas de saída situa-se na extremidade superior da porção cônica e é chamada de “vortex finder”, onde descarrega a suspensão diluída (overflow). A outra abertura de saída é o “apex” que descarrega a suspensão concentrada (underflow) (Chaves et al, 1996). A Figura 1 mostra um desenho de um hidrociclone em corte.



**Figura 1** – Esquema do hidrociclone mostrando as principais dimensões.

Hidrociclones são capazes de separar substâncias líquidas imiscíveis requerendo uma pressão diferencial para operar que pode ser fornecida por uma bomba (Chen et al, 2000).

O diâmetro da porção cilíndrica do ciclone é o parâmetro geométrico de efeito prático mais importante: ele determina o diâmetro de classificação de partículas separadas e é o responsável pela vazão que o equipamento suporta (o diâmetro do vortex finder também afeta essa propriedade, mas em menor proporção e são sempre decorrentes do diâmetro da porção cilíndrica do ciclone) (Chaves et al, 1996 e Rietema, 1961). Em consequência, a necessidade de efetuar o corte granulométrico pré-fixado impõe a escolha de um determinado diâmetro, na maior parte das operações industriais, insuficiente para a vazão desejada, portanto torna-se necessário usar vários ciclones em paralelo (Chaves et al, 1996).

O ciclone pode ser utilizado como equipamento de desaguamento. Isto é feito variando a abertura do apex: conforme ela diminui (dentro de limites adequados) aumenta a porcentagem de sólidos no underflow. Quando existe interesse em manter controle estreito sobre este parâmetro,

os ciclones podem ser equipados com dispositivo para regulação contínua do diâmetro do apex. Em outros casos, usa-se um sistema para inserir peças com diâmetro desejado na parte inferior do ciclone, fixando-se mediante dispositivos mecânicos e substituindo estas peças, conforme o desgaste alargue o orifício (Chaves et al, 1996).

Segundo Cilliers e Harrison (1997), hidrociclones de pequenos diâmetros apresentam uso crescente, efetuando difíceis separações entre fases, devido à grande força centrífuga gerada. O uso potencial de hidrociclones na concentração de suspensões microbiológicas é atraente, pois eles são contínuos, de alta capacidade de injeção, requerem baixa manutenção, além de possuírem o benefício adicional de poderem ser prontamente esterelizados. A separação de células microbiológicas de meio de cultura tem sido requerida na maior parte dos processos microbiológicos, quando se deseja separar células do próprio meio de cultivo, para obtenção de compostos intra ou extracelular; é um desafio a separação destas pequenas partículas (tipicamente de 1 a 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro) com baixa diferença de densidade em relação ao meio suspenso.

O projeto de hidrociclones, em geral, é baseado na maior parte por relações geométricas e em correlações derivadas do tempo consumido em estudos experimentais com uma ou mais geometrias específicas. Embora isto seja aceitável para determinadas geometrias e/ou aplicações, é um método útil para os fabricantes de ciclones validarem o desempenho de seus produtos. Esta aproximação não tem aplicação universal (Chen et al, 2000) e não se dirige aos fundamentos da mecânica dos fluidos que ocorre dentro do ciclone. Conseqüentemente, para o projeto de diferentes geometrias de ciclones com diferentes sistemas, o procedimento tem valor limitado.

Os modelos tradicionais de hidrociclones (Rietema e Bradley) são caracterizados pela formação de maior vórtice nas proximidades das paredes. Jirum et al (1990) construíram um novo modelo de hidrociclone, no qual nenhum vórtice forçado foi desenvolvido. O hidrociclone apresentou maior velocidade tangencial e menor velocidade radial que o tipo convencional de

hidrociclone. O aumento da velocidade tangencial implica no aumento da força centrífuga imposta na separação das partículas e conseqüentemente num melhor desempenho na separação das partículas com tamanho menor.

Para aplicações industriais, é desejável saber a taxa de escoamento, a concentração contínua, a distribuição do tamanho das partículas no underflow e overflow para uma dada alimentação sob determinadas condições de operação (Chen et al, 2000).

Silva (1989) cita que hidrociclones possuem diâmetro entre 1 e 250 cm, com diâmetro de corte para a maioria dos sólidos variando de 2  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ . A vazão de alimentação varia de 0,1 a 7200  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , a queda de pressão de 34 a 600 kPa e a concentração máxima de sólidos, que pode ser obtida no concentrado, raramente excede 45 a 50 % em volume.

Wesson e Peter (1994) avaliaram a performance de hidrociclones de diâmetro de 10 mm para separação de dispersões de óleo em água, com diluições (água/óleo > 500), com tamanho das gotículas entre 15  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$ . A alta velocidade da dispersão na entrada tangencial do hidrociclone induz a uma significativa força centrífuga nas pequenas gotículas de óleo dentro da câmara do vortex. Felizmente, para pequenas gotas estáveis, a fase dispersada separa melhor que a fase emulsionada. Entretanto, para a relação A/O, o elevado redemoinho que se forma no interior do hidrociclone flui dentro da região de entrada do hidrociclone, criando uma emulsão que dificultará a separação na escala de tempo avaliado para separação.

Petty e Parks (2004) utilizaram hidrociclones com diâmetro de 5 mm, com baixa capacidade de separação líquido-líquido e com baixa pressão ( $\ll$  1 bar). Esta estratégia requer muitos hidrociclones operando em paralelo para suportar a alta taxa de produção. Porém, a potencial redução no volume de um conjunto que usa múltiplos hidrociclones em paralelo é extensa. A baixa pressão de separação reduz o custo devido ao uso de materiais de menor custo e

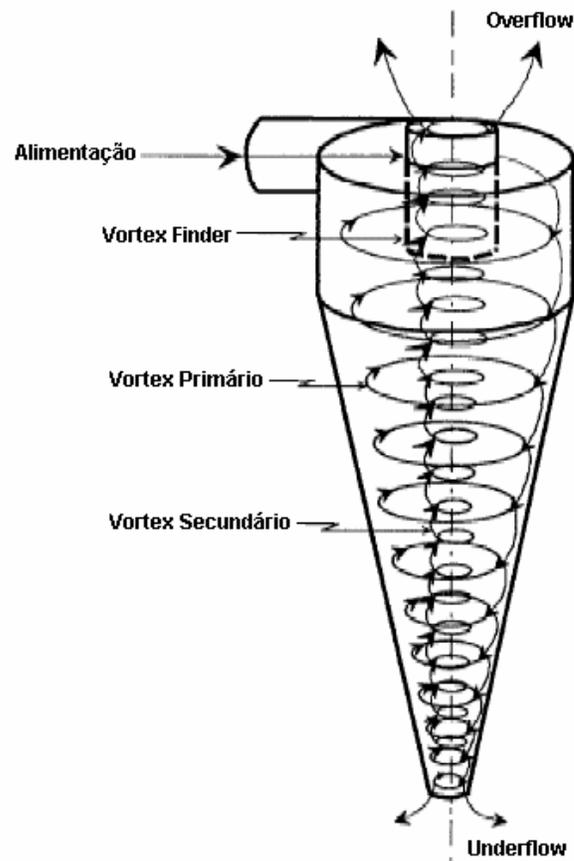
bombas menores são suficientes para dar suporte à separação. Além disso, o conjunto de hidrociclones com menores diâmetros ocupa uma pequena área.

### **2.3 – Mecanismos de separação no hidrociclone**

Segundo Chen et al (2000), modelos matemáticos estão disponíveis para calcular as eficiências de separação de partículas sólidas e líquidas em hidrociclones. Estes modelos são normalmente baseados em um ou mais dos seguintes princípios:

1. Modelos empíricos: Estes modelos são determinados por fórmulas de encaixe aos dados experimentais.
2. Teoria da órbita do equilíbrio: Uma partícula alcança uma posição de equilíbrio radial no ciclone quando é estabelecida sua velocidade final sendo igual à velocidade radial do líquido. Isso significa que se o líquido fluir para fora, as partículas irão para a parede e separadas no underflow. Se o líquido fluir para dentro, as partículas irão com o líquido pelo overflow.
3. Teoria do tempo de residência: Uma partícula é considerada separada se puder viajar na região cônica do ciclone.
4. Teoria bifásica do fluxo turbulento: A separação é causada pelo fluxo transversal turbulento que flui na direção perpendicular ao sentido do campo da força.

No ciclone atuam dois mecanismos diferentes sobre a separação das partículas sólidas. Um deles é o de sedimentação no campo centrífugo, através do qual as partículas mais pesadas deslocam-se em direção às paredes e depois para o underflow, enquanto empurram as partículas mais leves para o fluxo ascendente que sai pelo vortex finger. Outro é o arraste das partículas mais leves pelo fluxo ascendente. Estes dois mecanismos são afetados pela presença das partículas no manto: a existência destas partículas, nessa posição, interfere com o movimento em direção ao overflow, podendo melhorar ou prejudicar a seletividade da separação, conforme o caso. As partículas menores podem sair em qualquer um dos fluxos, dependendo da quantidade de outras partículas presentes, da quantidade de partículas no manto, da viscosidade da solução etc. Já as partículas maiores são pesadas demais para serem arrastadas pelo fluxo ascendente e só podem sair pelo underflow (Chaves et al, 1996). A Figura 2 mostra as trajetórias do líquido dentro do hidrociclone.



**Figura 2** – Esquema mostrando o escoamento interno do fluido no hidrociclone.

Silva (1989) e Soccol (2003) afirmam ainda que a maior parte da suspensão de alimentação deixa o hidrociclone através do tubo por onde sai a suspensão mais diluída. Assim forças centrífugas elevadíssimas são geradas no vórtex interno, propiciando uma separação secundária de elevada eficiência.

Um ponto importante no escoamento interno dos hidrociclones é a formação de um núcleo central gasoso. O movimento de rotação do líquido cria uma zona normal de baixa pressão que normalmente resulta na formação de uma superfície livre de líquido ao redor do eixo do hidrociclone. Se uma das saídas, ou ambas, estiverem abertas para a atmosfera, o núcleo gasoso central será formado por ar, caso contrário, o núcleo gasoso poderá ainda existir sendo formado

por vapor ou gases dissolvidos no líquido. Este núcleo gasoso central pode ser suprimido evitando a comunicação direta das correntes de saída com a atmosfera e por meio do controle da pressão nas tubulações das suspensões diluídas e concentradas. Geralmente, a ausência do núcleo central gasoso produz um aumento da queda de pressão, para uma mesma vazão de alimentação, assim como uma queda na eficiência de separação (Rietema, 1961; Silva, 1989; Soccol, 2003).

A existência de dois fluxos verticais, um descendente e outro ascendente implica na existência de um lugar geométrico onde a velocidade vertical é nula (somente a vertical – no plano horizontal elas continuam girando no sentido do fluxo rotacional). Este lugar geométrico é uma superfície cilíndrica cônica e é chamado “manto”. As partículas externas a este manto descarregam via underflow e as partículas internas, via overflow. As partículas que estão neste lugar geométrico são submetidas de maneira equilibrada à ação da força centrífuga e ao “empuxo” das partículas mais pesadas que as empurram na direção do vortex finder. Elas, tem portanto, chances iguais de se dirigirem para o underflow ou para o overflow (Chaves et al, 1996).

Dai et al (1999) mostraram que a pressão decresce gradualmente da entrada de alimentação para o apex e vortex finder. No mesmo corte de seção, a pressão é maior na parede do hidrociclone, e esta decresce suavemente e então acentuadamente próximo ao “air core”. A pressão mínima ocorre na superfície do centro do “air core” e é possível determinar se a medida da pressão é menor que zero na superfície do “air core”.

O fluxo num hidrociclone possui uma simetria circular com exceção da região do duto da entrada tangencial. A velocidade do fluxo em qualquer ponto do hidrociclone pode ser decomposta em três componentes: velocidade tangencial, velocidade radial e velocidade axial ou vertical. Os conceitos gerais sobre os perfis de velocidade no hidrociclone são apenas qualitativos, pois os modelos de fluxo nestes aparelhos são altamente complexos, inclusive para a

água com viscosidade e gravidade específica baixa. Assim seria errôneo presumir que modelos de fluxos similares ocorram em ciclones com diferentes geometrias e viscosidades diversas de fluidos (Svarovsky, 1990).

A velocidade radial das partículas tem um efeito significativo no processo de separação de um hidrociclone, e é o componente da velocidade mais importante para a separação de partículas sólidas de líquido. Na seção cônica de um hidrociclone, a velocidade radial aumenta da parede para o centro do hidrociclone (Dai et al, 1999).

Chu et al. (2000) mediram a turbulência através da relação com a pressão dentro do hidrociclone. Eles estudaram a flutuação da pressão em várias posições axiais e radiais dentro do hidrociclone. A maior flutuação de pressão encontrada seria perto da linha central do hidrociclone. Entretanto, Chu et al não estudaram a periodicidade das flutuações.

A relação entre os diâmetros do hidrociclone, o tamanho da entrada e as dimensões dos bocais do underflow e overflow afetam a concentração da entrada e o tamanho da gota dispersada que pode ser separada, tanto quanto a capacidade dos fluxos das gotas sob pressão. Os hidrociclones são capazes de separar misturas com diferença de concentração de até 30% entre os líquidos de diferentes densidades (por exemplo, óleo em água) e com gotas com diâmetro menor de 10  $\mu\text{m}$  (Dai et al, 1999).

As pesquisas atuais e passadas sobre o desempenho de hidrociclones vêm quase exclusivamente da indústria de mineração. Para os ciclones classificadores, tem sido elaborados dois tipos de modelos: o sintético e o analítico. Para poder descrever o comportamento, deve-se conhecer a dinâmica do escoamento no interior do ciclone. Os estudos feitos conduziram a uma equação que dá o diâmetro de corte  $d_{50}$ , que permite que as partículas tenham chances iguais de sair pelo topo ou pelo fundo do ciclone (Fehr e Cloutier, 1980).

## 2.4 – Equacionamento

Pereira e Massarani (1995) observaram que a maior parte dos trabalhos de separação sólido-fluido newtoniano em hidrociclones segue a formulação clássica semi-empírica de Svarovsky (1990), embora haja grande esforço no desenvolvimento de formulações mais científicas que englobem a modelagem do campo de velocidade no interior do equipamento.

O equacionamento que descreve a operação de hidrociclones baseia-se em tratamento adimensional. Os números adimensionais relevantes na operação desses dispositivos são os números de Stokes ( $Stk_{50}$ ), de Euler (Eu), de Reynolds (Re), além da concentração volumétrica de soluto na corrente de alimentação ( $C_v$ ) e da razão de líquido ( $R_L$ ) (Soccol, 2003; Valente, 2002; Svarovsky, 1990). As expressões para esses números adimensionais são:

$$Stk_{50} = \frac{(\rho_s - \rho)v_c(d'_{50})^2}{18\mu D_c} \quad (1)$$

$$Eu = \frac{2(-\Delta P)}{\rho v_c^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{D_c v_c \rho}{\mu} \quad (3)$$

onde  $\rho_s$  é a densidade do sólido,  $\rho$  é a densidade do líquido,  $\mu$  é a viscosidade do líquido,  $v_c$  é a velocidade de escoamento da suspensão baseada no diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone,  $d'_{50}$  o diâmetro de corte reduzido do dispositivo,  $D_c$  é o diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone,  $(-\Delta P)$  é a queda de pressão entre a alimentação e o overflow do equipamento. As

variáveis  $Q$ ,  $Q_u$ ,  $C_v$ ,  $C_{v_u}$  representam, as vazões volumétricas e concentrações volumétricas de soluto nas correntes de alimentação e do underflow, respectivamente.

Para avaliar o desempenho de um hidrociclone é necessário quantificar o seu diâmetro de corte e a relação vazão/queda de pressão. É importante, também, o estabelecimento das eficiências globais e individuais para as condições de operação desejada. Para estimar o diâmetro de corte, Medronho (1984) sugeriu a seguinte equação:

$$Stk_{50} = k_1 \left[ \ln \left( \frac{1}{R_L} \right) \right]^{k_2} k_3 C_v \quad (4)$$

onde  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são constantes que dependem da família de hidrociclones estudada e  $R_L$  representa a razão de líquido.

Na operação com hidrociclone, quando a suspensão de alimentação é introduzida no interior do mesmo, operando em regime permanente, uma fração do líquido junto com as partículas de maior velocidade terminal, é descarregada por meio do orifício da saída do concentrado. O restante do líquido, com as partículas de menor velocidade terminal é descarregado, por meio do tubo de saída da suspensão diluída (Silva, 1989). Segundo o autor, mesmo que o hidrociclone não esteja separando, devido à ação centrífuga, uma certa quantidade de sólidos é removida no concentrado, numa razão igual a razão de líquido  $R_L$ . Isto porque o hidrociclone age também como um divisor de escoamento, tal qual, um tubo de conexão T em tubulações (Soccol, 2003).

A razão de líquido  $R_L$  pode ser calculada pelas equações 5 e 6 representadas abaixo:

$$R_L = \frac{Q_u(1 - Cv_u)}{Q(1 - Cv)} \quad (5)$$

em que,

$Q$  – vazão da suspensão de alimentação,  $L.s^{-1}$

$Q_u$  – vazão da suspensão concentrada,  $L.s^{-1}$

$Cv$  - concentração volumétrica da suspensão da alimentação,  $L L^{-1}$ ; e

$Cv_u$  - concentração volumétrica da suspensão concentrada,  $L L^{-1}$ ; e

$$R_L = B \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^c \quad (6)$$

onde  $D_c$  e  $D_u$  são, respectivamente, os diâmetros da parte cilíndrica do hidrociclone e do duto de saída do underflow,  $B$  e  $C$  são parâmetros que devem ser ajustados para cada família de hidrociclones.

A separação num hidrociclone entre sólidos e líquidos é incompleta. Uma fração de sólidos percorre para o vortex finder ao invés de ir totalmente para o apex, e uma fração de água da alimentação se dirige para o fluxo concentrado (underflow). Ambas quantificações de performance requerem dois valores; a recuperação de sólidos da alimentação para o underflow,  $R$ , e a razão da concentração,  $C$ , a razão das concentrações do underflow e da alimentação. Ambos  $R$  e  $C$  devem ser maximizados.

A recuperação volumétrica total,  $R_v$ , é a razão entre a vazão da suspensão concentrada e alimentação, que deve ser minimizada.

$$R_v = \frac{Q_u}{Q} \quad (7)$$

Para hidrociclones com ambos fluxos (underflow e overflow) emergindo a pressão ambiente,  $R_v$  não é controlada. Preferencialmente, a razão da concentração do overflow para a concentração da alimentação deve ser zero.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros da família de Rietema e Bradley obtidos por estes pesquisadores e compara com parâmetros obtidos para os hidrociclones cilíndricos levantados por Dal Pai Neto et al (1999).

**Tabela 1** - Constantes das Eqs. 4 e 6, para as famílias de hidrociclones de Rietema, Bradley e cilíndricos.

	$k_1$	$k_2$	$k_3$	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Rietema</b>	0,0474	0,742	8,96	145,0	4,75
<b>Bradley</b>	0,055	0,66	12,00	54,6	2,61
<b>Cilíndrico</b>	1,28	0,60	-	5,8	1,68

Fonte: Rietema (1961) e Bradley (1965).

A Tabela 1 não apresenta o valor do parâmetro  $k_3$ , que se refere ao termo de concentração, para o hidrociclone cilíndrico, pois o efeito da concentração não foi estudado por Rietema (1961) e Bradley (1965). Outra equação importante é a que relaciona o número de Euler com o número de Reynolds e a concentração volumétrica da alimentação  $C_v$ . De acordo com Medronho (1984) tem-se que:

$$Eu = k_4 Re^{k_5} Cv^{k_6} \quad (8)$$

onde  $k_4, k_5$  e  $k_6$  são constantes para uma dada família de hidrociclones. Os valores dessas constantes, sugeridos por Medronho (1984), encontram-se listados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Constantes da Equação 8 para as famílias de hidrociclones de Rietema e Bradley.

<b>Hidrociclone</b>	$k_4$	$k_5$	$k_6$
<b>Bradley</b>	258,0	0,370	-
<b>Rietema</b>	371,5	0,116	- 2,12

Fonte: Rietema (1961) e Bradley (1965).

Segundo Castilho e Medronho (2000) existem apenas dois grupos bem conhecidos de hidrociclones geometricamente semelhantes que são os de Rietema (1961) e Bradley (1965). Os autores apresentam proporções geométricas dos dois grupos de hidrociclones, observado na Tabela 3.

**Tabela 3** – Proporções geométricas de dois modelos de hidrociclones.

<b>Hidrociclone</b>	<b><math>D_i/D_c</math></b>	<b><math>D_o/D_c</math></b>	<b><math>L/D_c</math></b>	<b><math>L_1/D_c</math></b>	<b><math>l/D_c</math></b>	<b><math>\theta</math></b>
Bradley	1/7	1/5	-	1/2	1/3	9°
Rietema	0,28	0,34	5	-	0,40	20°

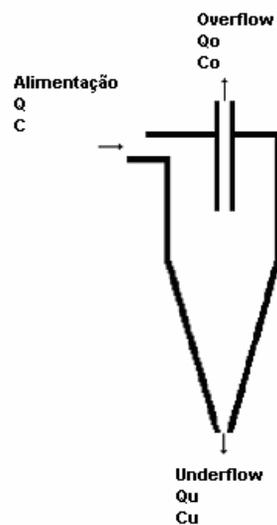
Fonte: Castilho e Medronho (2000)

Castilho e Medronho (1995) utilizando suspensões aquosas a 1% (p/v) de material particulado com densidade igual a 2,9 g.cm<sup>-3</sup>, observaram que a vazão produzida por hidrociclones de Rietema é de 2,0 a 2,7 vezes maior que a produzida por hidrociclones de Bradley, para determinada queda de pressão e tamanho do equipamento. Por outro lado, estes

últimos geram diâmetro de corte reduzido sempre menores que os primeiros e, conseqüentemente, maiores eficiências globais de separação. Concluindo, portanto, que os hidrociclones de Rietema são de alta capacidade e os de Bradley de alta eficiência.

## 2.5 - Eficiência do hidrociclone

A Figura 3 apresenta um esquema simplificado do balanço de massa de um hidrociclone (Svarovsky,1990).



**Figura 3** – Esquema simplificado mostrando o balanço de massa de um hidrociclone.

O balanço de massa global no hidrociclone considerando que não haja acúmulo dentro do mesmo é dado por:

$$(C_o \times Q_o) + (C_u \times Q_u) = (C \times Q) \quad (9)$$

em que:

$Q$  vazão volumétrica da corrente de alimentação  $L^3.T^{-1}$

$Q_o$  vazão volumétrica da corrente do overflow  $L^3.T^{-1}$

$Q_u$  vazão volumétrica da corrente do underflow  $L^3.T^{-1}$

$C$  concentração volumétrica da suspensão na corrente de alimentação ( $M.L^{-3}$ )

$C_o$  concentração volumétrica da suspensão na corrente do overflow ( $M.L^{-3}$ ).

$C_u$  concentração volumétrica da suspensão na corrente do underflow ( $M.L^{-3}$ )

A eficiência total de separação do hidrociclone é definida como sendo a razão entre a massa total de sólidos coletado no concentrado e a massa total de sólidos na alimentação.

$$E_t = \left( \frac{C_u \times Q_u}{C \times Q} \right) \quad (10)$$

Onde:  $E_t$  - eficiência total adimensional

A equação também pode ser reescrita como:

$$E_t = \frac{M_u}{M} \quad (11)$$

Onde:

$M_u$  – massa de sólidos presente no underflow (kg)

$M$  – massa de sólidos presente na corrente de alimentação (kg)

No caso de eficiência total são considerados todos os sólidos existentes no concentrado, inclusive aqueles que não foram separados devido a ação centrífuga. O efeito T verificado no hidrociclone garante uma eficiência mínima de separação. Assim a contribuição do “fluxo morto” (parte do líquido alimentado que é enviado ao concentrado) deve ser subtraída, obtendo-se assim, o verdadeiro desempenho de separação do hidrociclone. A eficiência total reduzida foi sugerida pela Malvern Master Sizer (Malvern instrument, MSS).

$$E_T = \left( \frac{M_u \times C_u \times Q_u}{M \times C \times Q} \right) \quad (12)$$

onde  $E_T$  - Eficiência Total Reduzida

$Q$ : vazão volumétrica da corrente de alimentação  $L^3.T^{-1}$

$Q_u$ : vazão volumétrica da corrente do underflow  $L^3.T^{-1}$

$C$ : concentração volumétrica da suspensão na corrente de alimentação ( $M.L^{-3}$ )

$C_u$ : concentração volumétrica da suspensão na corrente de underflow ( $M.L^{-3}$ )

M: fração mássica de sólidos na alimentação

$M_u$ : fração mássica de sólidos no underflow

Dentre os demais números adimensionais encontrados na literatura para verificar a eficiência das famílias de hidrociclones podemos apresentar a eficiência granulométrica adimensional (G) que está definida na Equação 13:

$$G = E_T \left( \frac{dF_u(X)}{dF(X)} \right) \quad (13)$$

onde X é o diâmetro da partícula, F e  $F_u$  são as frações mássicas das partículas menores que um dado diâmetro X, nas correntes de alimentação e de underflow, respectivamente.

## **2.6 - Separações centrífugas**

Segundo Cilliers e Harrison (1997) e Lima (1996), centrífugas e ciclones funcionam com o mesmo princípio de aumento do campo centrífugo para afetar a separação entre sólidos e líquidos, sólidos ou líquidos de diferentes tamanhos e/ou diferentes densidades. Tradicionalmente, hidrociclones funcionam com menor campo centrífugo que as centrífugas. Portanto, o campo centrífugo produzido pode ser aumentado pelo decréscimo do diâmetro do hidrociclone. Por exemplo, campos na faixa de 10 000 - 50 000 g podem ser produzidos em um hidrociclone de 10 mm de diâmetro a uma capacidade de aproximadamente 150 h<sup>-1</sup>.

A característica fundamental dessas separações é a substituição da força da gravidade que atua sobre as partículas por uma força centrífuga de maior intensidade que pode ser aumentada à nossa conveniência aumentando-se a rotação. Tudo se passa como se o peso das partículas fosse multiplicado por um fator maior que um, de modo que a sedimentação das partículas no seio do líquido poderá ser tão rápida quanto se desejar. Empregam-se, também, normalmente, na separação de líquidos imiscíveis, na separação de partículas sólidas ou gotículas em suspensão nos gases, para separação de gases finamente dispersos em líquidos e para classificação hidráulica de misturas de sólidos (Gomide, 1980).

As centrífugas podem ser descontínuas, semi-contínuas ou contínuas. No primeiro caso a carga e a descarga são feitas com a centrífuga parada. Nas operações semi-contínuas ainda é realizada em batelada, porém não se interrompe a operação para carregar e descarregar. Isto acarreta economia no consumo de energia porque grande parte do consumo é necessário para levar a máquina até a rotação de regime. Finalmente, o terceiro tipo de operação é inteiramente contínuo, sendo a alimentação e a descarga realizadas em regime permanente (Gomide, 1980).

## **2.7 - Utilização do hidrociclone para separação de microorganismos.**

Medronho et. al. (2005) comentaram que uma possível aplicação do uso de hidrociclone é na perfusão de culturas de células humanas. A retenção de células na perfusão de culturas é normalmente executada usando centrifugação, microfiltração de fluxo transversal, filtração rotacional, sedimentação e separação ultra-sônica. Infelizmente, todos esses processos de separação têm problemas específicos de aplicação (Castilho e Medronho, 2000). O uso do

hidrociclone poderá aumentar a confiabilidade do processo, desde que não haja manutenção e o tempo de vida útil seja extremamente grande para sua aplicação.

Hidrociclones modelo de Bradley com diâmetros menores que 10 mm não podem separar eficientemente bactérias e leveduras, mas a separação de células humanas foi alcançada com uma eficiência de 90%. Medronho et al (2005) fizeram trabalho com hidrociclone modelo de Bradley com diâmetro de 10 mm e diâmetro do underflow de 1 mm, processando  $28 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  de alimentação de suspensão de células em água a  $20^\circ\text{C}$ . Não foi possível separar *Escherichia coli* com o hidrociclone estudado. Como hidrociclones de Bradley são ciclones de alta eficiência (Castilho e Medronho, 2000), foi possível concluir que bactérias não podem ser separadas em hidrociclones com diâmetros abaixo de 10 mm. Leveduras podem ser separadas somente à baixas eficiências centrífugas. Entretanto, o uso de hidrociclones convencionais para separar leveduras é suposto ser inviável. Por outro lado, uma eficiência de 90% foi obtida para a separação de células humanas.

Uma interessante comparação pode ser feita baseada no trabalho de Cilliers e Harrison (1997). Estes autores trabalharam com um Mozley hidrociclone de 10 mm de diâmetro e com diâmetros de overflow e underflow de 2 mm e 1 mm, respectivamente. Estas três dimensões são exatamente as mesmas dimensões do hidrociclone modelo de Bradley. Os autores obtiveram eficiência total experimental de 27% trabalhando com uma vazão de alimentação da suspensão de leveduras de  $28 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Para esta taxa de alimentação, a eficiência total simulada encontrada foi 28%.

Considerando novas aplicações, o uso de hidrociclones para separação de leveduras de processos fermentativos ou de suspensões de leveduras em água tem sido investigadas por alguns autores (Rickwood et al., 1992; Yuan et al., 1996a e 1996b e Cilliers and Harrison, 1997).

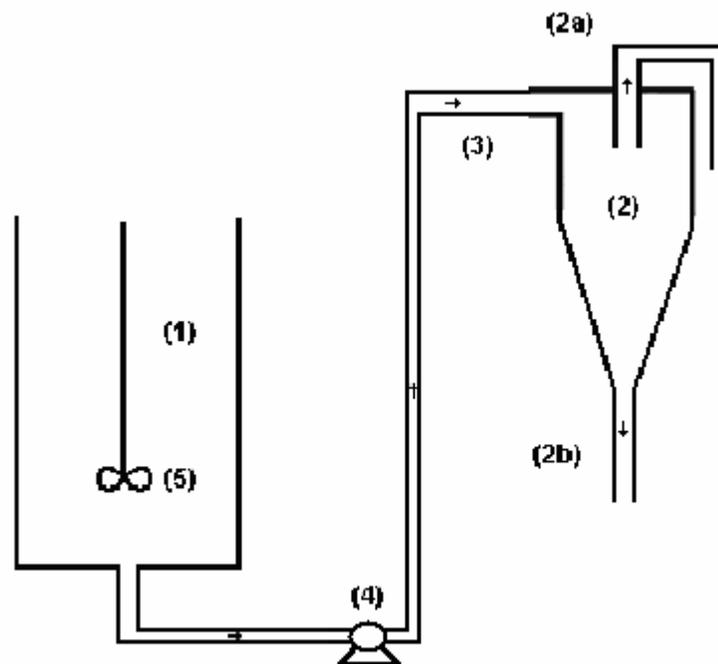
Mesmo usando hidrociclones com diâmetro igual ou menor a 10 mm, esses autores não puderam obter alta eficiência de separação em conjunto com altas concentrações no underflow.

Bergstrom e Vomhoff (2006) reportando o estudo de Yamamoto et al. (1997), verificaram que poucos estudos dão atenção para a diferença no campo do fluxo interno que é causada por uma simples variação na geometria do hidrociclone. Apresentou um hidrociclone com o cilindro interno perfurado, o que melhorou a eficiência de separação do equipamento afetando o vortex interno, assim como, a área da velocidade radial interna mais para a seção cônica que para a entrada do vortex finder.

### 3 – MATERIAIS E METODOS

#### 3.1 – Construção dos modelos de hidrociclones

Os equipamentos foram montados na Planta Piloto do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA), da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da UNICAMP. Ao todo foram construídos cinco modelos de hidrociclones que diferenciam quanto à forma e dimensão. Os modelos construídos foram submetidos à bancada de ensaio a fim de serem caracterizados pela sua eficiência de separação.



**Figura 4** – Esquema do ensaio com o hidrociclone mostrando seus principais componentes.

- (1) **Tanque de alimentação:** tanque com capacidade de 100 litros para armazenamento de emulsão de óleo em água ou suspensão de *Saccharomyces cerevisiae* ou de pequenas partículas de carvão em água.
- (2) **Hidrociclone:** modelo a ser ensaiado (Bradley, CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub>, CM<sub>3</sub> e CM<sub>4</sub>).
- (2a) **Tubulação do overflow:** onde foram coletadas amostras da corrente do overflow.
- (2b) **Tubulação do underflow:** onde foram coletadas amostras da corrente do underflow.
- (3) **Tubulação da alimentação:** tubulação de alimentação do hidrociclone com a emulsão de óleo em água ou suspensão de *Saccharomyces cerevisiae* ou de pequenas partículas de carvão em água.
- (4) **Bomba:** bomba centrífuga Dancor modelo W-56 1098 com potência de 1 HP, RPM 3480, 110-220 V – Brasil ou modelo 56J0994 com potência de 0,5 HP, RPM 3420, 110 V – Brasil.
- (5) **Agitador submersível:** marca Fisatom Brasil, modelo 713 D, potência 70-130 w, 115-230 v, com a finalidade de manter a emulsão ou suspensão uniforme durante toda a operação.

Para a realização do estudo experimental foram montados sistemas conforme representado na Figura 4, constituído de um tanque de armazenamento da suspensão do óleo emulsionado em água, com agitação mecânica, e uma bomba centrífuga (½ HP ou 1 HP), para bombear esta emulsão para o hidrociclone. Os hidrociclones foram construídos com aço inoxidável 316 L. Os fluxos de saída (underflow e overflow) eram abertos para a atmosfera.

Em prosseguimento ao trabalho foram feitos testes de aplicação dos hidrociclones construídos para a concentração de células de *Saccharomyces cerevisiae* e para separação sólido-líquido de finas partículas de carvão (<0,149mm) em água. Foram desenvolvidos e construídos os

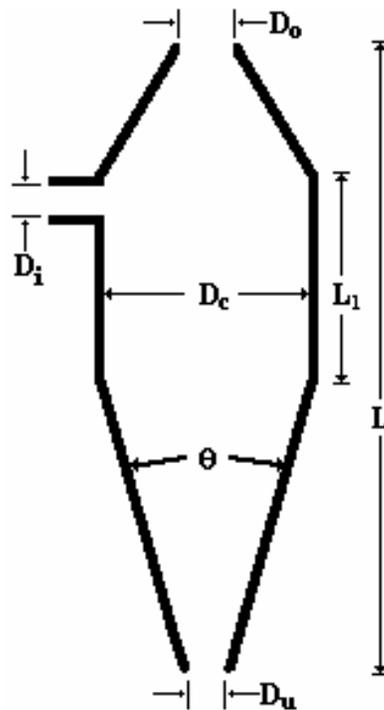
modelos de hidrociclones denominados (CM<sub>1</sub>), (CM<sub>2</sub>), (CM<sub>3</sub>) e (CM<sub>4</sub>) baseados nos parâmetros definidos por Rietema e Bradley, cujas dimensões se encontram na Tabela 4.

Foram identificadas as variáveis relevantes que interferem no processo de separação e os modelos foram modificados para obter-se uma melhor eficiência no processo.

**Tabela 4:** Dimensões dos modelos de hidrociclone de Rietema, Bradley, CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub>, CM<sub>3</sub> e CM<sub>4</sub>.

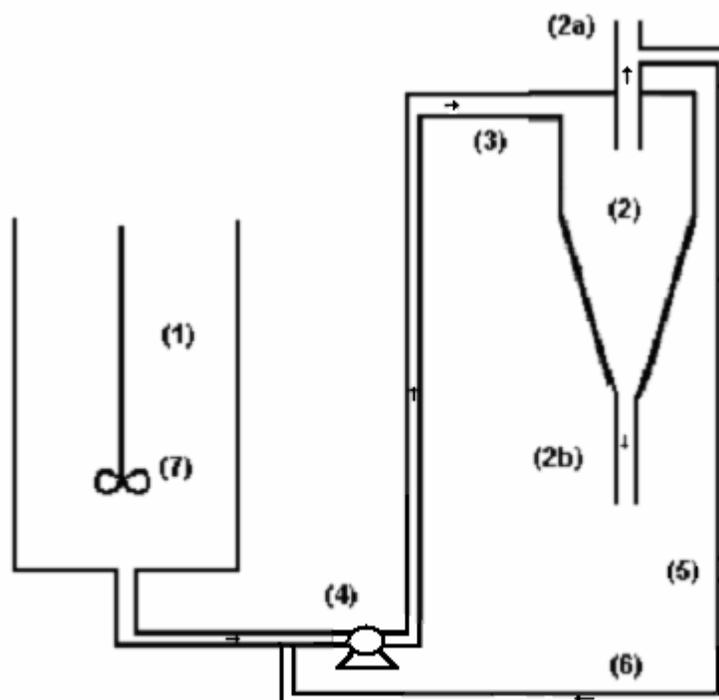
(mm)	D <sub>c</sub>	D <sub>o</sub>	D <sub>i</sub>	D <sub>u</sub>	L	l	L <sub>1</sub>	P	θ (°)
<b>Rietema</b>	50	18	14	10	250	20	65	-	12,3
<b>Bradley</b>	50	10	7	3,5	174	16	25	-	11,3
<b>CM<sub>1</sub></b>	50	8	8	8	172	-	50	-	10
<b>CM<sub>2</sub></b>	50	8	8	8	250	64	64	3,5	15,4
<b>CM<sub>3</sub></b>	50	8	8	8	250	185,5	64	3,5	15,4
<b>CM<sub>4</sub></b>	35	4,9	4,9	4,9	250	30	30	3,5	12,3

O hidrociclone modelo CM<sub>1</sub> possui uma parte cilíndrica central ligada a duas partes cônicas, dessa forma não apresenta o tubo de comprimento (I) no interior da parte cilíndrica do ciclone apresentado pelos modelos de hidrociclones convencionais. Este modelo está ilustrado na Figura 5. O modelo de hidrociclone CM<sub>1</sub> construído foi apresentado na Figura 9.



**Figura 5** – Esquema do hidrociclone ( $CM_1$ ) mostrando as principais dimensões.  $D_i$  – Diâmetro da abertura de alimentação;  $D_c$  – Diâmetro da parte cilíndrica;  $D_o$  – Diâmetro do overflow;  $D_u$  – Diâmetro do underflow;  $L$  – Altura do hidrociclone;  $L_1$  – Altura da seção cilíndrica;  $\theta$  – Ângulo do cone.

Instalou-se um sistema de reciclo do concentrado com parte do fluxo retornando diretamente até a bomba, nos modelos que contiveram eficiência satisfatória. Foi instalado um rotâmetro para medir a vazão volumétrica do reciclo. Dessa forma, pretendeu-se atingir uma melhor eficiência no processo de separação do óleo emulsionado. O sistema de reciclo foi apresentado na Figura 6.



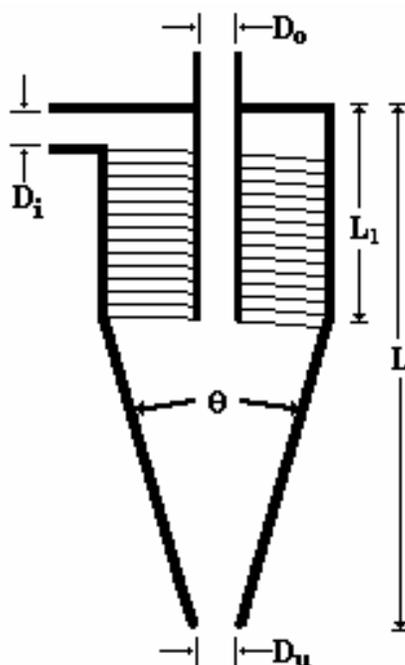
**Figura 6** – Esquema de reciclo da alimentação do hidrociclone (CM<sub>1</sub>) mostrando seus componentes.

- (1) **Tanque de alimentação:** tanque de alimentação com 30 L da emulsão de óleo-água.
- (2) **Hidrociclone:** a ser ensaiado
- (2a) **Tubulação do overflow:** onde foram coletadas amostras da corrente do overflow.
- (2b) **Tubulação do underflow:** onde foram coletadas amostras da corrente do underflow.
- (3) **Tubulação da alimentação:** tubulação de alimentação do hidrociclone com a emulsão de óleo em água.
- (4) **Bomba:** bomba centrífuga Dancor modelo W-56 1098, com potência de 1 HP, RPM 3480, 110-220 V – Brasil ou modelo 56J0994 com potência de 0,5 HP, RPM 3420, 110 V – Brasil

(5) **Rotâmetro:** medidor da vazão volumétrica do refluxo, inicialmente calibrado, marca Gilmont modelo PF 010, faixa de vazão de 0 a 1000 L.h<sup>-1</sup>.

(6) **Reciclo:** parte do concentrado retorna diretamente até a bomba.

(7) **Agitador submersível:** marca Fisatom Brasil, modelo 713 D, potência 70-130 W, 115-230 V, com a finalidade de manter a emulsão ou suspensão uniforme durante toda a operação.

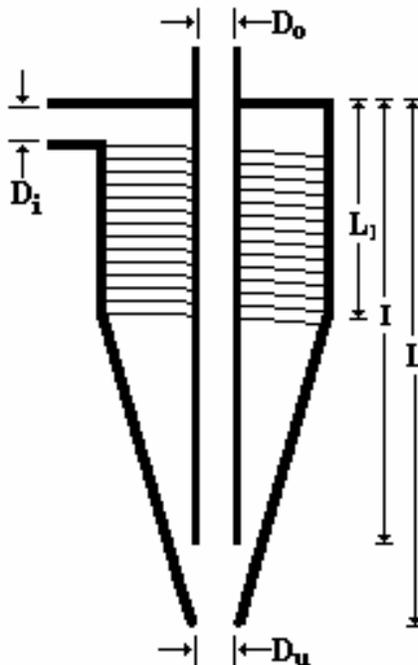


**Figura 7** – Esquema do hidrociclone (CM<sub>2</sub>) mostrando as principais dimensões.  $D_i$  – Diâmetro da abertura de alimentação;  $D_o$  – Diâmetro do overflow;  $D_u$  – Diâmetro do underflow;  $L$  – Altura do hidrociclone;  $L_1$  – Comprimento da seção cilíndrica;  $\theta$  - Ângulo do cone.

Seguindo o processo de adaptação do modelo de hidrociclone, foi construído o hidrociclone CM<sub>2</sub>, apresentado na Figura 7, seguindo as medidas dos modelos convencionais, alterado pela inserção de uma rosca sem fim de 11 filetes com passo de 3,5 mm na parte cônica

do mesmo, com a finalidade de atingir uma melhor eficiência, devido ao aumento do tempo de residência da amostra no interior do equipamento. O modelo de hidrociclone  $CM_2$  construído foi apresentado na Figura 9.

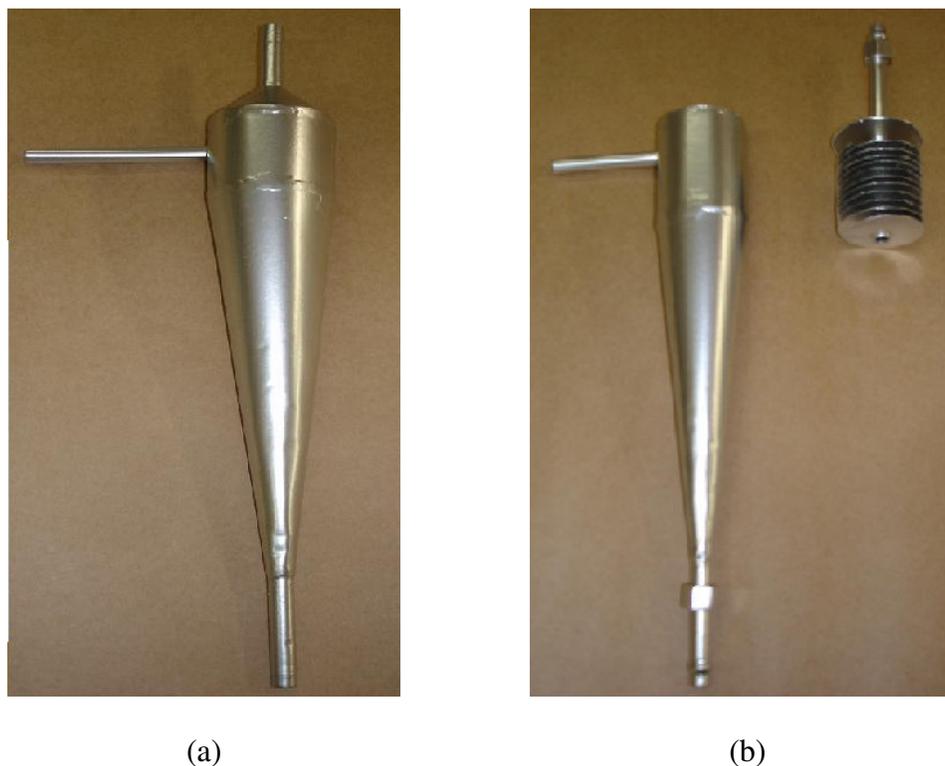
Baseado no trabalho de Jirum et al (1990), o hidrociclone  $CM_2$  foi modificado pelo prolongamento da inserção do tubo do overflow, em 185,5 mm, até as proximidades do tubo do underflow, transformando-se no modelo de hidrociclone denominado ( $CM_3$ ). A sua geometria foi apresentada na Figura 8.



**Figura 8** – Esquema do hidrociclone ( $CM_3$ ) mostrando as principais dimensões.  $D_i$  – Diâmetro da abertura de alimentação;  $D_o$  – Diâmetro do overflow;  $D_u$  – Diâmetro do underflow;  $L$  – Altura do hidrociclone;  $L_1$  – Comprimento da seção cilíndrica;  $I$  – Comprimento do tubo.

O modelo de hidrociclone  $CM_4$  é geometricamente semelhante ao modelo  $CM_2$ , porém contendo seis filetes de rosca sem fim com passo de 3,5 mm. As medidas do hidrociclone  $CM_4$  estão contidas na Tabela 4, essas foram baseadas no modelo de Bradley, com a inserção de rosca sem fim na parte cônica do mesmo, com a finalidade de atingir melhor eficiência, devido ao aumento do tempo de residência da amostra no interior do equipamento.

Não existe nenhum trabalho a fim de comparações com a utilização dos modelos convencionais de hidrociclone para separação de óleo emulsionado de água. Para tal comparação foram realizados testes com o hidrociclone de Bradley (1965), cujas definições estão especificadas na Tabela 4.



**Figura 9** – Hidrociclones modelos  $CM_1$  (a) e  $CM_2$  (b) construídos com aço inoxidável 316 L. A rosca sem fim apresentada (b) foi inserida na parte cilíndrica do hidrociclone  $CM_2$ .

### **3.2 – Utilização do hidrociclone para concentração de células de *Saccharomyces cerevisiae* suspensas em água.**

O hidrociclone CM<sub>2</sub> também foi aplicado na tentativa de concentrar células de *Saccharomyces cerevisiae* em água. As células de *Saccharomyces cerevisiae* foram obtidas de fermento fresco. Os estudos experimentais foram montados conforme o sistema detalhado e representado anteriormente na Figura 4.

### **3.3 – Material de ensaio**

Utilizou-se como material de ensaio para os testes de eficiência do hidrociclone:

- Emulsão de óleo de soja em água;
- Solução de células de *Saccharomyces cerevisiae* em água;
- Solução de finas partículas de carvão (< 0,149 mm) em água.

#### **3.3.1 - Preparo das emulsões e soluções de alimentação do sistema.**

##### **3.3.1.1 – Preparo das emulsões de óleo em água**

Os ensaios foram conduzidos utilizando-se 30 litros da emulsão de óleo em água, com concentração de 1% (v/v) de óleo emulsificado em água. A emulsão foi preparada dispersando-se óleo de soja em água com agitação da mistura por 5 minutos a 22.000 rpm com emulsificador Ultra Turrax da marca IKA T 18 basic.

### **3.3.1.2 – Preparo das suspensões de *Saccharomyces cerevisiae***

Células de *Saccharomyces cerevisiae* foram usadas como modelo de suspensão microbiológica. Foram preparados 25 litros de suspensão com concentração de 1,0 % (p/p), usadas nos ensaios, por meio da diluição de 250 g de fermento, previamente esfarelos em pequenos grânulos de forma a facilitar a dissolução, em uma pequena porção de água, seguido de uma leve agitação mecânica, de forma a obter-se uma suspensão homogênea. Essa foi diluída em água (1:25 v/v).

### **3.3.1.3 – Preparo das suspensões de carvão vegetal**

O carvão foi moído em triturador elétrico da marca RADAR - UCHIYAMA & CIA, modelo 5415. Posteriormente este foi peneirado, para seleção das partículas retidas nas peneiras. Na análise granulométrica foi utilizado um jogo de 4 peneiras, previamente taradas. As peneiras foram arranjadas em ordem decrescente de abertura da malha (0,45 mm, 0,30 mm, 0,180 mm e 0,149 mm) sobre um sistema agitador Prooutest, sendo que a de menor abertura ficava na parte inferior. O vibrador foi ligado por um período de 30 minutos; em seguida as amostras foram pesadas.

As suspensões de carvão foram preparadas adicionando-se vagarosamente 300 g da amostra no reservatório, posteriormente diluídas com 30 litros de água de forma a obter suspensões de carvão de  $10\text{g.L}^{-1}$  e/ou 1,0% (m/v).

### **3.4 – Procedimentos experimentais**

Os ensaios experimentais seguiram aos seguintes procedimentos: inicialmente o sistema era acionado pela bomba centrífuga. Esperava-se o sistema entrar em equilíbrio e iniciava-se a tomada dos dados de vazão volumétrica das correntes de overflow e underflow. A vazão foi medida com o uso de proveta de 500 mL e cronômetro. As medidas de vazão volumétrica eram feitas em seis repetições. A vazão volumétrica da corrente de alimentação foi determinada pela soma das correntes do underflow e overflow.

Uma vez encerrada a leitura de vazão precedia-se à coleta de amostras da alimentação, overflow e underflow, simultaneamente, para posterior análise da concentração de óleo emulsionado em água, de partículas de carvão ou células de *Saccharomyces cerevisiae* em água.

Após a coleta das amostras, essas eram imediatamente diluídas na proporção de 1:25 para a análise da concentração de óleo nas correntes de alimentação, overflow e underflow.

Para os ensaios com *Saccharomyces cerevisiae* e carvão, imediatamente após a coleta dos dados de vazão volumétrica eram coletados 10 mL de amostras da suspensão das correntes de alimentação, underflow e overflow em tubos de ensaio para posterior determinação da massa seca. Os testes foram realizados em triplicata. A quantificação da concentração de células de *Saccharomyces cerevisiae* ( $\text{g.L}^{-1}$ ) e a concentração de partículas de carvão em ( $\text{g.L}^{-1}$ ) foram feitas por secagem a vácuo (640 mmHg) a 65°C até peso constante.

A determinação da concentração de óleo nas correntes de alimentação, overflow e underflow foram feitas pelo método da demanda química de oxigênio (DQO).

### **3.4.1 – Determinação da concentração de óleo emulsionado em água.**

Para determinação da concentração de óleo emulsionado em água, nas amostras, foram feitas análises de DQO: em tubos de ensaio com tampas rosqueadas, foram adicionados 2,5 mL de amostra, 1,5 mL de solução de dicromato de potássio e sulfato de mercúrio em meio ácido e 3,5 mL de solução ácida de sulfato de prata. Para valores de DQO maiores que 2.000 mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, a amostra foi diluída dez vezes. Para estabelecer o branco foi feito o mesmo procedimento no qual a amostra foi substituída por água destilada. Os tubos de reação foram então colocados em digestor Hach por duas horas a 150°C. Após esse tempo, os tubos foram removidos e resfriados, ao abrigo da luz, e realizada a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 610 nm.

Para melhorar a precisão do método da DQO, calculou-se a concentração de óleo nas amostras a partir da equação da reta gerada com a mesma emulsão de óleo em água usada na alimentação do sistema, para eliminar erros causados pela diluição das amostras.

### **3.4.2 – Determinação da concentração de *Saccharomyces cerevisiae***

A separação de células foi avaliada através da quantificação da massa celular seca. Foram coletadas 10 mL das amostras da corrente do underflow, overflow e alimentação, posteriormente centrifugada a 7000 rpm a temperatura controlada de 15°C por 20 minutos. O sobrenadante foi descartado e a sua massa celular decantada foi seca a vácuo de 640mmHg a 65°C por 24 horas. Assim, pela diferença de massa do tubo com e sem as células, expressou-se a massa celular seca em termos de concentração (g.L<sup>-1</sup>).

### **3.4.3 – Determinação da concentração de partículas de carvão.**

A separação das partículas de carvão foi avaliada através da quantificação da massa seca da amostra coletada em cada fluxo (overflow, underflow e alimentação) do sistema. Foram coletadas 10 mL das amostras da corrente do underflow, overflow e alimentação em tubos de centrífuga, posteriormente centrifugada a 7000 rpm a temperatura controlada de 15°C por 20 minutos. O sobrenadante foi descartado e a massa de carvão decantada foi seca a vácuo de 640mmHg a 65°C por 24 horas. Assim, pela diferença da massa do tubo com e sem as partículas de carvão, expressou-se a massa de carvão em termos de concentração ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

### **3.5 - Balanço de massa do sistema**

Para o cálculo do balanço de massa do sistema foi utilizada a seguinte equação:

$$(C_{Vo} \times Q_o) + (C_{Vu} \times Q_u) = (C_V \times Q) \quad (10)$$

onde as variáveis  $Q$ ,  $Q_o$ ,  $Q_u$ ,  $C_V$ ,  $C_{Vo}$  e  $C_{Vu}$  representam as vazões volumétricas e concentrações das correntes de alimentação, overflow e underflow respectivamente.

### 3.6 – Análise dimensional do sistema

A análise dimensional foi utilizada para determinar as variáveis relevantes que interferem no processo, sendo determinados os números adimensionais para avaliar o comportamento do sistema.

As variáveis envolvidas no processo, bem como seus símbolos e suas dimensões, estão apresentados na Tabela 5:

**Tabela 5** – Variáveis envolvidas no processo, seus símbolos e suas dimensões.

Variáveis	Símbolo	Dimensões
Concentração de óleo na alimentação	$C_{O_A}$	$ML^{-3}$
Concentração de óleo no overflow	$C_{O_O}$	$ML^{-3}$
Diâmetro do cilindro	$D_c$	L
Passo da rosca	P	L
Velocidade da alimentação	$v_A$	$L T^{-1}$
Densidade da água	$\rho_{\text{água}}$	$ML^{-3}$
Viscosidade da água	* $\mu_{\text{água}}$	$M L^{-1} T^{-1}$
Diâmetro da partícula de óleo	* $D_p$	L
Densidade do óleo	* $\rho_{\text{óleo}}$	$ML^{-3}$

Nota: M – massa/ L – comprimento/ T – tempo

As variáveis destacadas com um asterisco (\*) foram as variáveis consideradas na análise dimensional. As outras variáveis ficaram implícitas na análise dos resultados. Logo foram

utilizadas 9 variáveis a serem consideradas na análise adimensional e 3 dimensões, sendo o número de grupos adimensionais determinados igual a 6 (9-3).

Após a definição das variáveis de trabalho, pelo teorema  $\pi$  - Buckingham foi possível gerar 6  $\pi$  - grupos:

$$\pi_1 = (\mu_{\text{água}})^a (D_p)^b (\rho_{\text{óleo}})^c (Co_A)^d$$

$$\pi_1 = [M L^{-1} T^{-1}]^a [L]^b [ML^{-3}]^c [ML^{-3}]^d$$

$$[M] = a + c + d = 0$$

$$[L] = -a + b - 3c - 3d = 0$$

$$[T] = -a = 0$$

Resolvendo o sistema acima temos que  $a = b = 0$  e  $c = -1$ . Então o primeiro adimensional encontrado é:

$$\pi_1 = (Co_A) (\rho_{\text{óleo}})^{-1}$$

Resolvendo o sistema inicial dá-se origem ao segundo número adimensional.

$$\pi_2 = (\mu_{\text{água}})^a (D_p)^b (\rho_{\text{óleo}})^c (Co_o)^d$$

$$\pi_2 = [M L^{-1} T^{-1}]^a [L]^b [ML^{-3}]^c [ML^{-3}]^d$$

Conforme calculado para  $\pi_1$  encontramos  $\pi_2$ :

$$\pi_2 = Co_o / \rho_{\text{óleo}}$$

Para determinação do  $\pi_3$  foi utilizada a seguinte equação:

$$\pi_3 = (\mu_{\text{água}})^a (D_p)^b (\rho_{\text{óleo}})^c (Dc)^d$$

$$\pi_3 = [M L^{-1} T^{-1}]^a [L]^b [ML^{-3}]^c [L]^d$$

$$[M] = a + c = 0$$

$$[L] = -a + b - 3c + d = 0$$

$$[T] = -a = 0$$

Resolvendo o sistema, temos que  $a = c = 0$  e  $b = -1$ , obtemos o terceiro número adimensional:

$$\pi_3 = Dc/D_p$$

Para determinação do  $\pi_4$  foi utilizada a seguinte equação:

$$\pi_4 = (\mu_{\text{água}})^a (D_p)^b (\rho_{\text{óleo}})^c (P)^d$$

$$\pi_4 = [M L^{-1} T^{-1}]^a [L]^b [M L^{-3}]^c [L]^1$$

Conforme calculado para  $\pi_3$  encontramos  $\pi_4$ :

$$\pi_4 = P/D_p$$

Para determinação do  $\pi_5$  foi utilizada a seguinte equação:

$$\pi_5 = (\mu_{\text{água}})^a (D_p)^b (\rho_{\text{óleo}})^c (v_a)^d$$

$$\pi_5 = [M L^{-1} T^{-1}]^a [L]^b [M L^{-3}]^c [L T^{-1}]^1$$

$$[M] = a + c = 0$$

$$[L] = -a + b - 3c + 1 = 0$$

$$[T] = -a - 1 = 0$$

Resolvendo o sistema, temos o quinto número adimensional:

$$\pi_5 = \frac{D_p v_a \rho_{\text{óleo}}}{\mu_{\text{água}}}$$

Seguindo para a determinação dos números adimensionais temos as seguintes equações:

$$\pi_6 = (\mu_{\text{água}})^a (D_p)^b (\rho_{\text{óleo}})^c (\rho_{\text{água}})^d$$

$$\pi_6 = [M L^{-1} T^{-1}]^a [L]^b [M L^{-3}]^c [M L^{-3}]^1$$

$$[M] = a + c + 1 = 0$$

$$[L] = -a + b - 3c - 3 = 0$$

$$[T] = -a = 0$$

Resolvendo o sistema, temos que  $a = b = 0$  e  $c = -1$ . Assim foi encontrado o sexto número adimensional:

$$\pi_6 = \rho_{\text{água}} / \rho_{\text{óleo}}$$

## **4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os cinco modelos de hidrociclones (modelo de Bradley, CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub>, CM<sub>3</sub> e CM<sub>4</sub>) foram testados com diferentes vazões volumétricas de alimentação, overflow e underflow. Além disso, foram realizados alguns testes com reciclo do concentrado na entrada da bomba centrífuga. Essas vazões volumétricas variavam de acordo com a potência da bomba e capacidade de cada equipamento.

### **4.1 – Hidrociclone CM<sub>1</sub>**

A Tabela 6 apresenta os dados experimentais médios de desempenho do hidrociclone CM<sub>1</sub> operando com emulsão de óleo em água, utilizando uma bomba centrífuga de ½ HP. Pode-se observar que a vazão volumétrica da alimentação, overflow e underflow variaram de 88,70 a 174,10 mLs<sup>-1</sup>, 19,30 a 148,70 mLs<sup>-1</sup> e 18,60 a 131,90 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente. A temperatura da emulsão variou entre 29 e 38°C, durante os ensaios. A Tabela 6, mostra a concentração de óleo (g.L<sup>-1</sup>) nas correntes de alimentação [A], overflow [O] e underflow [U] para diferentes vazões volumétricas de underflow (Q<sub>u</sub>), overflow (Q<sub>o</sub>) e alimentação (Q<sub>a</sub>).

De acordo com os dados dispostos da Tabela 6, observa-se que a concentração de óleo na saída do overflow é maior que no underflow, portanto quando a vazão volumétrica do underflow é muito maior que a do overflow, a concentração de óleo na saída do underflow é maior que no overflow, pois o óleo é forçado a sair pela região de vazão volumétrica superior.

**Tabela 6:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone ( $CM_1$ ) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de ½ HP com diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ ( $mL s^{-1}$ )	$Q_o$ ( $mL s^{-1}$ )	$Q_a$ ( $mL s^{-1}$ )	[U] ( $g L^{-1}$ )	[O] ( $g L^{-1}$ )	[A] ( $g L^{-1}$ )	$E_T$	$R_L$
21,80	108,00	129,90	8,52	9,45	9,50	0,827	0,827
96,80	20,10	116,90	9,98	9,07	9,50	0,870	0,163
18,60	101,90	120,50	9,86	11,36	11,40	0,843	0,842
72,70	24,00	96,70	12,46	11,27	12,24	0,765	0,227
52,40	36,30	88,70	12,92	11,89	12,43	0,614	0,412
35,70	55,80	91,50	2,53	2,66	2,64	0,614	0,617
21,80	84,20	106,00	2,27	2,80	2,64	0,842	0,872
84,70	19,30	104,00	3,25	2,13	3,13	0,846	0,098
25,40	148,70	174,10	7,19	8,40	7,99	0,898	0,904
131,90	27,70	159,60	6,07	4,70	5,90	0,850	0,131

Segundo Chaves et al (1996), as partículas mais pesadas deslocam-se em direção às paredes e depois para o underflow, enquanto empurram as partículas mais leves para o fluxo ascendente que sai pelo vortex finger e ocorre o arraste das partículas mais leves pelo fluxo ascendente.

A Tabela 6 mostra que a vazão volumétrica do underflow, overflow e alimentação e conseqüentemente a velocidade das correntes afetam a eficiência de separação, devido à força centrífuga gerada no sistema. Quanto maior a vazão da corrente de alimentação, maior a força centrífuga gerada no sistema.

Esses modelos de hidrociclone são em geral baseados na teoria de órbita do equilíbrio. As partículas ocupam uma posição de equilíbrio radial no hidrociclone onde a velocidade terminal estabelecida é igual à velocidade radial do líquido. O que significa, que se o líquido fluir para fora, as partículas irão direção à parede e serão separadas pelo underflow. Se o líquido fluir para dentro, as partículas irão com o líquido para o overflow (Svarovsky, 1994).

A Tabela 7 apresenta os dados experimentais médios de desempenho do hidrociclone CM<sub>1</sub> operando em sistema de reciclo com emulsão de óleo em água, utilizando bomba centrífuga de ½ HP. Pode-se observar que as vazões volumétricas da alimentação, overflow, underflow e reciclo variaram de 55,74 a 113,35 mLs<sup>-1</sup>, 23,52 a 90,24 mLs<sup>-1</sup>, 12,36 a 57,95 mLs<sup>-1</sup> e 19,61 a 123,34 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente. A temperatura das emulsões variou entre 29 e 34°C, durante os ensaios. A vazão volumétrica da alimentação corresponde ao somatório das vazões volumétricas do underflow e overflow.

**Tabela 7:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone ( $CM_1$ ) operando em reciclo com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de  $\frac{1}{2}$  HP com diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ), alimentação ( $Q_a$ ) e reciclo ( $Q_r$ ) e fluxo que retorna para bomba ( $Q_b$ ).

$Q_u$ ( $mL s^{-1}$ )	$Q_o$ ( $mL s^{-1}$ )	$Q_a$ ( $mL s^{-1}$ )	$Q_r$ ( $mL s^{-1}$ )	* $Q_b$ ( $mL s^{-1}$ )	[A] ( $g L^{-1}$ )	[U] ( $g L^{-1}$ )	[O] ( $g L^{-1}$ )	$E_T$	$R_L$
34,89	42,25	77,14	64,07	141,21	167,83	112,79	180,15	0,588	0,588
57,95	23,52	81,47	93,71	175,18	201,29	207,01	155,94	0,732	0,223
26,31	63,47	89,78	107,04	196,82	173,99	154,18	173,11	0,703	0,703
29,86	68,93	98,79	78,89	177,68	218,02	192,04	222,42	0,712	0,712
25,88	50,08	75,96	123,34	199,30	193,36	154,18	185,00	0,631	0,631
37,90	50,49	88,39	47,77	136,16	188,08	168,27	205,69	0,625	0,625
49,39	41,88	91,27	93,70	184,97	126,88	146,25	100,02	0,624	0,361
29,65	64,96	94,61	93,70	188,31	206,13	196,01	214,50	0,714	0,715
26,30	54,78	81,08	110,01	191,09	216,26	179,27	233,43	0,729	0,730
41,25	62,41	103,66	78,89	182,55	225,95	217,14	229,03	0,610	0,610
29,76	43,84	73,60	112,97	186,57	211,42	150,65	229,47	0,647	0,647
21,31	71,63	92,94	78,89	171,83	147,28	114,11	144,05	0,754	0,754
50,87	36,51	87,38	92,22	179,60	111,91	134,36	76,24	0,699	0,283
27,33	53,72	81,05	64,07	145,12	189,40	161,66	193,36	0,677	0,677
19,13	52,02	71,15	64,07	135,22	207,01	166,50	205,69	0,726	0,726
17,98	37,76	55,74	101,11	156,85	220,66	183,68	225,95	0,694	0,694
18,45	50,57	69,02	64,07	133,09	127,32	91,65	125,56	0,723	0,722
12,36	76,17	88,53	49,25	137,78	127,32	106,62	122,47	0,828	0,827
23,11	90,24	113,35	19,61	132,96	126,14	89,74	118,80	0,750	0,749

\*  $Q_b = Q_r + Q_a$

$Q_b$  foi usado para representar o fluxo de emulsão que entra diretamente na bomba, esse valor foi calculado pela soma das vazões volumétricas da alimentação e reciclo.  $Q_b$  variou de 132,96 a 199,30 mLs<sup>-1</sup> para o hidrociclone CM<sub>1</sub>.

A eficiência global de separação do óleo variou de 0,588 a 0,754 (ver Tabela 7) e de 0,614 a 0,898 (ver Tabela 6) usando o modelo de hidrociclone CM<sub>1</sub> operando com e sem reciclo, respectivamente, usando uma bomba centrífuga de ½ HP, conforme definido pela Equação (10). As Tabelas 6 e 7 contém dados sobre a  $R_L$  do CM<sub>1</sub> operando, respectivamente sem reciclo e com reciclo, que variou de 0,098 a 0,904 e de 0,223 a 0,827.

Nenhuma diferença significativa entre as concentrações de óleo nas correntes do overflow e underflow foram encontradas para o hidrociclone CM<sub>1</sub> operando sob condições com reciclo ou sem reciclo. Porém, a diferença de concentração de óleo emulsionado no underflow e overflow no hidrociclone CM<sub>1</sub> operando sob condições de reciclo (ver Tabela 7) foi significativamente maior que no hidrociclone operando sem reciclo (ver Tabela 6) sob as mesmas condições de operação. Isso indica que a Equação (10) não está indicando claramente o nível de eficiência total do equipamento.

Outro importante aspecto dos resultados de distribuição do óleo nas correntes do underflow e overflow nos hidrociclones CM<sub>1</sub> e CM<sub>2</sub>, mostra que o óleo tende a se concentrar no overflow, devido a menor densidade das partículas de óleo. Portanto, percebe-se que se a vazão volumétrica do underflow for bem maior que a vazão volumétrica do overflow, as partículas são forçadas a saírem pelo underflow devido à maior corrente de fluido. Silva (1989) e Soccol (2003) afirmam ainda que a maior parte da suspensão de alimentação deixa o hidrociclone através do tubo do diluído. Assim forças centrífugas elevadíssimas são geradas no vórtex interno, propiciando uma separação secundária de elevada eficiência.

#### **4.2– Hidrociclone CM<sub>2</sub>**

A vazão volumétrica da alimentação, overflow e underflow variaram de 67,96 a 127,51 mLs<sup>-1</sup>, 32,61 a 93,73 mLs<sup>-1</sup> e 13,37 a 90,62 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente, para o hidrociclone CM<sub>2</sub>, operando com bomba centrífuga de ½ HP para alimentação da emulsão de óleo em água. A temperatura da emulsão variou de 29 a 36°C, durante o processo.

Pode ser observado nas Tabelas 6 e 8 que a diferença de concentração de óleo no underflow e overflow no hidrociclone CM<sub>2</sub> é significativamente maior que no hidrociclone CM<sub>1</sub>. Isto pode ser devido ao maior tempo de retenção do fluido no hidrociclone CM<sub>2</sub> que possuía uma rosca sem fim inserida no seu interior que permitiu que o fluxo percorresse entre as voltas da rosca sem fim, conseqüentemente aumentando o tempo de residência da suspensão no interior do equipamento.

A eficiência global de separação variou de 0,477 a 0,852 (ver Tabela 8) para o modelo CM<sub>2</sub> operando com bomba centrífuga ½ HP, e calculada conforme definido pela Equação (10). Pode-se observar que a R<sub>L</sub> do hidrociclone CM<sub>2</sub> variou de 0,250 a 0,852 (ver Tabela 8) nessas condições.

**Tabela 8:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>2</sub>) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de ½ HP com diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mL s <sup>-1</sup> )	[U] (g L <sup>-1</sup> )	[O] (g L <sup>-1</sup> )	[A] (g L <sup>-1</sup> )	$E_T$	$R_L$
31,31	87,58	118,89	81,96	109,26	99,14	0,812	0,813
65,79	50,18	115,97	81,96	109,26	99,14	0,477	0,477
43,32	50,07	93,39	109,26	124,23	117,63	0,566	0,566
67,39	60,12	127,51	167,38	116,31	148,45	0,596	0,369
43,71	49,19	92,90	108,38	134,80	128,64	0,555	0,555
40,60	68,36	108,96	165,62	180,59	181,03	0,626	0,626
31,02	87,43	118,45	163,86	167,38	170,47	0,725	0,725
24,82	72,58	97,40	120,27	148,89	143,17	0,775	0,775
41,77	77,84	119,61	109,70	132,60	127,76	0,675	0,676
90,62	32,61	123,23	137,00	135,68	143,61	0,702	0,250
62,28	64,54	126,82	112,79	122,03	122,91	0,505	0,505
28,52	75,93	104,45	187,20	216,26	215,38	0,730	0,730
19,22	89,95	109,17	197,77	317,09	308,28	0,847	0,848
29,96	66,83	96,79	236,51	263,37	260,73	0,697	0,697
31,72	84,68	116,40	167,38	313,57	281,43	0,811	0,811
20,47	92,07	112,54	118,07	164,74	158,14	0,852	0,852
18,23	93,73	111,96	139,65	189,84	189,84	0,837	0,837
22,38	68,41	90,79	180,15	222,42	221,54	0,756	0,757
13,37	54,59	67,96	162,54	180,59	187,20	0,775	0,775
15,14	66,41	81,55	208,33	247,08	250,60	0,803	0,803
18,68	84,68	103,36	211,42	241,36	244,44	0,809	0,809

O hidrociclone CM<sub>2</sub> apresenta uma distância de 2,8 mm entre as voltas do parufuso. Esse tipo de equipamento requer limpeza e inspeção contínua, para assegurar a operação satisfatória do sistema. O entupimento com óleo compromete o perfeito funcionamento do sistema, devido à oxidação do material. Uma forma de evitar isto seria construir o hidrociclone com chapa de aço inoxidável.

As Tabelas 8 e 9 mostram que com utilização da bomba centrífuga de 1 HP pode-se ter maior vazão de alimentação, conseqüentemente maior velocidade de entrada que com bomba centrífuga de ½ HP. A velocidade tangencial é o fator mais importante da performance de um hidrociclone e seu aumento implica em maior força centrífuga gerada para a separação das partículas e separação das partículas de menor tamanho (Jirum et al, 1990).

Observa-se na Tabela 9 que as vazões volumétricas da alimentação, overflow e underflow variaram de 115,97 a 162,01 mLs<sup>-1</sup>, 50,18 a 114,49 mLs<sup>-1</sup> e 29,40 a 91,66 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente, para o hidrociclone CM<sub>2</sub>, operando com bomba centrífuga de 1 HP. Para o sistema operando em reciclo essas vazões variaram de 74,92 a 127,34 mLs<sup>-1</sup>, 58,90 a 93,54 mLs<sup>-1</sup> e 16,02 a 45,66 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente e a vazão volumétrica do reciclo variou de 64,07 a 152,98 mLs<sup>-1</sup> (ver Tabela 10). A temperatura da emulsão utilizada na alimentação se manteve entre 29 e 43°C, durante o processo.

A eficiência global de separação variou de 0,623 a 0,797 (ver Tabela 10) e de 0,477 a 0,827 (ver Tabela 9) para o modelo de hidrociclone CM<sub>2</sub> operando com sistema de reciclo e sem reciclo respectivamente, usando bomba centrífuga de 1 HP. O cálculo da eficiência global do sistema foi feito de acordo com o especificado na Equação (10).

**Tabela 9:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>2</sub>) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mL s <sup>-1</sup> )	[U] (g L <sup>-1</sup> )	[O] (g L <sup>-1</sup> )	[A] (g L <sup>-1</sup> )	$E_T$	$R_L$
31,31	87,56	118,87	37,49	47,01	46,30	0,652	0,651
58,86	96,11	154,97	114,99	126,88	126,00	0,625	0,625
65,79	50,18	115,97	81,96	109,26	99,14	0,477	0,477
26,91	114,49	141,40	111,47	138,76	136,12	0,825	0,826
91,66	70,35	162,01	96,93	114,99	108,38	0,461	0,461
28,40	100,30	128,70	58,19	100,02	94,29	0,827	0,827
39,15	106,58	145,73	78,00	119,83	125,00	0,701	0,701
40,12	95,07	135,19	64,35	81,52	82,40	0,696	0,696
59,55	97,31	156,86	102,67	113,23	120,27	0,584	0,584
41,13	94,17	135,30	140,97	153,29	155,94	0,684	0,684

Observa-se pela Tabela 9 que as menores eficiências atingidas (0,461 e 0,477) foram para dois ensaios onde a vazão volumétrica do underflow foi maior que a vazão volumétrica do overflow. Também foi possível constatar que a concentração de óleo emulsionado no underflow era menor que a concentração na alimentação e conseqüentemente a concentração de óleo no overflow era maior ou aproximadamente igual à concentração da alimentação.

**Tabela 10:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>2</sub>) operando em reciclo com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ), alimentação ( $Q_a$ ), reciclo ( $Q_r$ ) e retorno para bomba ( $Q_b$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_r$ (mL s <sup>-1</sup> )	* $Q_b$ (mL s <sup>-1</sup> )	[A] (g L <sup>-1</sup> )	[U] (g L <sup>-1</sup> )	[O] (g L <sup>-1</sup> )	$E_T$	$R_L$
40,09	65,80	105,89	107,04	212,93	217,14	196,89	217,58	0,623	0,623
45,66	78,74	124,40	64,07	188,47	264,69	237,83	263,37	0,630	0,630
24,29	82,56	106,85	95,19	202,04	266,01	233,43	266,02	0,773	0,773
23,65	77,17	100,82	115,93	216,75	266,01	231,23	259,85	0,748	0,748
32,76	73,51	106,27	106,27	212,54	271,30	245,32	267,34	0,682	0,682
37,74	89,6	127,34	93,704	221,044	277,46	248,84	276,58	0,701	0,701
42,4	71,29	113,69	123,34	237,03	221,98	215,38	249,72	0,705	0,706
23,41	83,08	106,49	102,6	209,09	205,69	169,15	206,57	0,784	0,784
30,66	80,75	111,41	108,52	219,93	178,83	152,41	177,07	0,718	0,718
39,51	80,44	119,95	67,03	186,98	274,38	243,56	278,78	0,681	0,681
25,92	93,54	119,46	78,89	198,35	239,19	185,44	231,23	0,757	0,757
22,82	76,33	99,15	152,98	252,13	187,20	148,89	193,80	0,797	0,797
22,85	73,69	96,54	108,52	205,06	186,32	148,45	184,56	0,756	0,756
24,82	61,31	86,13	123,34	209,47	173,11	144,49	166,95	0,687	0,686
16,02	58,90	74,92	138,16	213,08	193,36	159,90	188,08	0,765	0,765

$$Q_b = Q_r + Q_a$$

$Q_b$  variou de 186,98 a 252,13 mLs<sup>-1</sup> no hidrociclone CM<sub>2</sub> operando com bomba centrífuga de 1 HP, sob condições de reciclo.

Embora a bomba centrífuga usada nesses ensaios (ver Tabela 9 e 10) tivesse potência de 1 HP, o resultado obtido não foi tão diferente dos resultados usando bomba centrífuga de ½ HP

(ver Tabela 8), apesar da diferença de vazão de alimentação, o que pode ser consequência da alta turbulência no interior do hidrociclone.

As diferenças das concentrações de óleo emulsionado em água entre o overflow e underflow nos testes, utilizando o hidrociclone operando em reciclo foi significativamente maior que no hidrociclone CM<sub>2</sub> operando sem reciclo, com o uso de bomba centrífuga de 1 HP.

### **4.3 – Hidrociclone CM<sub>3</sub>**

As vazões volumétricas da alimentação, overflow e underflow variaram de 100,48 a 157,80 mLs<sup>-1</sup>, 40,77 a 114,47 mLs<sup>-1</sup> e 24,93 a 111,06 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente, para o hidrociclone CM<sub>3</sub>, operando com bomba centrífuga de 1 HP. A temperatura da emulsão variou de 29 a 31°C, durante o processo.

Jirum et al (1990) construiu um modelo de hidrociclone similar, com a inserção de um tubo na parte cilíndrica. A partir de seu trabalho foi possível concluir que devido à inserção do tubo, nenhum vórtice forçado foi desenvolvido. O hidrociclone apresentou maior velocidade tangencial e menor velocidade radial que o tipo convencional de hidrociclone. O aumento da velocidade tangencial implica no aumento da força centrífuga imposta na separação das partículas e conseqüentemente num melhor desempenho na separação das partículas com tamanho menor.

**Tabela 11:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>3</sub>) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mL s <sup>-1</sup> )	[A] (g L <sup>-1</sup> )	[U] (g L <sup>-1</sup> )	[O] (g L <sup>-1</sup> )	$E_T$	$R_L$
24,93	82,82	107,75	205,25	161,66	210,54	0,788	0,789
30,11	76,69	106,80	199,97	157,26	203,05	0,729	0,729
29,99	70,49	100,48	199,97	161,66	209,65	0,735	0,736
111,06	40,77	151,83	174,43	157,26	194,24	0,299	0,299
51,17	95,82	146,99	199,97	177,07	216,26	0,705	0,705
35,01	101,10	136,11	214,50	172,23	221,54	0,767	0,767
88,90	56,59	145,49	100,01	84,61	106,63	0,415	0,415
109,46	48,34	157,80	174,43	155,50	192,92	0,339	0,339
50,49	101,58	152,07	173,11	142,29	181,92	0,702	0,702
39,19	114,47	153,66	248,84	208,33	256,33	0,767	0,767

A eficiência global de separação variou de 0,299 a 0,788 (ver Tabela 11) para o modelo de hidrociclone CM<sub>3</sub> sendo alimentado por bomba centrífuga de 1 HP. Este apresentou uma  $R_L$  variando de 0,299 a 0,789 (ver Tabela 11). Por meio da análise da diferença de concentração de óleo entre as correntes do underflow e overflow, pode-se observar que o hidrociclone CM<sub>3</sub> não apresentou diferença significativa de eficiência em relação ao modelo tradicional de Bradley. O

hidrociclone CM<sub>3</sub> apresentou diferença entre as concentrações de óleo nas correntes do underflow e overflow semelhante à do hidrociclone CM<sub>2</sub> operando em sistema de reciclo. Portanto, em relação ao CM<sub>2</sub>, o hidrociclone CM<sub>3</sub> foi um pouco mais eficiente, entretanto a eficiência de separação atingida ainda não foi satisfatória para o equipamento ser utilizado no tratamento de efluentes.

#### **4.4 – Hidrociclone CM<sub>4</sub>**

As vazões volumétricas da alimentação, overflow e underflow variam de 98,30 a 128,71 mLs<sup>-1</sup>, 45,23 a 94,38 mLs<sup>-1</sup> e 31,67 a 58,54 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente, para o hidrociclone CM<sub>4</sub>, operando com bomba centrífuga de 1 HP na alimentação da emulsão de óleo em água. A temperatura da emulsão variou de 29 a 31°C, durante o processo. A eficiência global de separação do óleo variou de 0,559 a 0,796 (ver Tabela 12) usando este modelo de hidrocilone. A R<sub>L</sub> apresentada na Tabela 12 variou entre 0,353 e 0,796.

Fazendo a comparação da eficiência global do hidrociclone CM<sub>4</sub> e do hidrociclone modelo de Bradley, observou-se que não houve diferença significativa na separação de óleo emulsionado de água entre os dois modelos de equipamentos.

**Tabela 12:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>4</sub>) operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mL s <sup>-1</sup> )	[U] (g L <sup>-1</sup> )	[O] (g L <sup>-1</sup> )	[A] (g L <sup>-1</sup> )	$E_T$	$R_L$
31,67	94,38	126,05	160,78	215,82	202,96	0,796	0,796
46,78	51,52	98,30	213,18	252,81	236,95	0,559	0,559
37,33	74,99	112,32	159,90	200,85	192,48	0,697	0,697
58,54	45,23	103,77	189,40	139,65	172,23	0,620	0,353
42,32	86,39	128,71	88,56	145,36	132,60	0,736	0,736
38,70	75,44	114,14	119,39	184,12	192,48	0,632	0,632

#### 4.5 – Hidrociclone modelo de Bradley

A fim de comparações dos novos modelos de hidrociclones modificados, a Tabela 13 apresenta os resultados médios dos ensaios experimentais de desempenho do hidrociclone modelo de Bradley operando com emulsão de óleo em água, utilizando bomba centrífuga de 1 HP, sob as mesmas condições de operação utilizadas nos demais modelos.

**Tabela 13:** Dados médios da concentração de óleo, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone modelo de Bradley operando com emulsão de óleo em água, alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mL s <sup>-1</sup> )	[A] (g L <sup>-1</sup> )	[U] (g L <sup>-1</sup> )	[O] (g L <sup>-1</sup> )	$E_T$	$R_L$
31,71	71,36	103,07	196,00	160,34	206,13	0,728	0,728
54,28	54,76	109,04	122,03	86,37	135,68	0,558	0,559
41,40	65,77	107,17	132,60	100,90	145,37	0,673	0,673
21,26	84,16	105,42	138,77	94,73	143,61	0,826	0,826
33,17	65,78	98,95	122,03	97,38	132,60	0,722	0,723
53,62	53,77	107,39	122,03	189,40	233,43	0,958	0,962
42,62	64,44	107,06	208,34	170,91	217,14	0,627	0,627
53,74	53,66	107,40	219,34	185,44	233,43	0,532	0,532
53,37	54,16	107,53	219,34	194,68	243,59	0,560	0,560
32,64	72,44	105,08	219,34	208,77	252,37	0,793	0,794
51,64	54,57	106,21	219,34	207,89	255,45	0,598	0,599
31,43	74,18	105,61	219,34	209,65	255,45	0,818	0,819
34,80	75,11	109,91	191,16	147,13	193,80	0,693	0,693
37,87	61,51	99,38	185,44	153,74	188,96	0,631	0,631
47,19	56,12	103,31	196,89	161,66	207,01	0,571	0,571
30,88	75,48	106,36	210,54	167,83	214,50	0,723	0,723
23,99	84,20	108,19	203,49	161,66	206,57	0,790	0,790
29,99	70,49	100,48	199,97	161,66	209,65	0,736	0,736
30,11	76,69	106,80	199,97	157,26	203,05	0,729	0,729
24,93	82,82	107,75	205,25	161,66	210,53	0,788	0,789

Pode-se observar que as vazões volumétricas da alimentação, overflow e underflow variaram de 98,95 a 109,91 mLs<sup>-1</sup>, 53,66 a 84,20 mLs<sup>-1</sup> e 21,26 a 54,28 mLs<sup>-1</sup>, respectivamente. A temperatura da emulsão variou entre 29 e 33°C, durante os ensaios.

Pela Tabela 13 observa-se que o óleo emulsionado tende a se concentrar na fração do overflow, conforme detectado nos demais modelos de hidrociclones.

Segundo disposto na Tabela 13, a diferença entre as concentrações de óleo no underflow e overflow no hidrociclone modelo de Bradley foram maiores que a diferença entre as concentrações de óleo entre o underflow e overflow do hidrociclone CM<sub>1</sub> e CM<sub>2</sub>.

A Tabela 4 apresentada mostra que o hidrociclone modelo de Bradley apresenta medidas de diâmetros da alimentação, overflow e underflow menores que os diâmetros dos hidrociclones construídos CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub> e CM<sub>3</sub>.

A eficiência global de separação do óleo variou de 0,532 a 0,958 (ver Tabela 13) usando o hidrociclone modelo de Bradley, com bomba centrífuga de 1 HP responsável pela alimentação do hidrociclone.

Segundo Chaves et al (1996) e Rietema (1961) o diâmetro da porção cilíndrica do ciclone é o parâmetro geométrico de efeito prático mais importante: ele determina o diâmetro de classificação de partículas separadas e é o responsável pela vazão que o equipamento suporta (o diâmetro do vortex finder também afeta essa propriedade, mas em menor proporção e são sempre decorrentes do diâmetro da porção cilíndrica do ciclone) e os hidrociclones de pequenos diâmetros apresentam uso crescente, efetuando difíceis separações entre fases, devido à grande força centrífuga gerada (Cilliers e Harrison, 1997).

Partindo-se desses dados foi construído o hidrociclone CM<sub>4</sub>, com menores dimensões, a fim de melhorar a eficiência de separação de óleo emulsionado de água.

#### **4.6 – Utilização de modelos de hidrociclone para concentração de *Saccharomyces cerevisia*.**

A Tabela 14 apresenta os dados experimentais médios de vazões volumétricas das correntes de alimentação, underflow e overflow e a massa seca de *Saccharomyces cerevisia* em cada amostra coletada em cada corrente do hidrociclone CM<sub>2</sub>, operando com suspensão microbiológica de *Saccharomyces cerevisia* a 1,0% (v/v). As vazões volumétricas da alimentação, overflow e underflow variaram de 83,30 a 123,33 mLs<sup>-1</sup>, 31,51 a 89,65 mLs<sup>-1</sup> e 22,95 a 86,03 mLs<sup>-1</sup> respectivamente. A temperatura da suspensão variou de 29 a 33°C, durante o processo.

De acordo com os resultados da quantificação de massa seca de *Saccharomyces cerevisia*, pode-se concluir que o hidrociclone estudado não é eficiente para a separação de leveduras.

Os hidrociclones modelo de Bradley com diâmetros menores ou iguais a 10 mm não são eficientes para separar bactérias. Leveduras podem ser separadas apenas com alta eficiência de centrifugação. Portanto, o uso de hidrociclones convencionais para separação de leveduras é ineficaz (Castilho e Medronho, 2000).

Analisando a fração massa seca de células de *Saccharomyces cerevisia*, não foi feito o cálculo de eficiência de separação, pois não houve diferença significativa entre as concentrações de massa seca do underflow e overflow.

O uso potencial de hidrociclones na concentração de suspensões microbiológicas é atrativo porque estes equipamentos requerem pouca manutenção, além do benefício adicional de serem prontamente esterelizados (Cilliers e Harrison, 1996 e Lima et al, 1996).

**Tabela 14:** Dados médios da massa de *Saccharomyces cerevisia*, coletada nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A] em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>2</sub>) operando com suspensão de *Saccharomyces cerevisia* em água (1,0 % p/v), alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow (Q<sub>u</sub>), overflow (Q<sub>o</sub>) e alimentação (Q<sub>a</sub>).

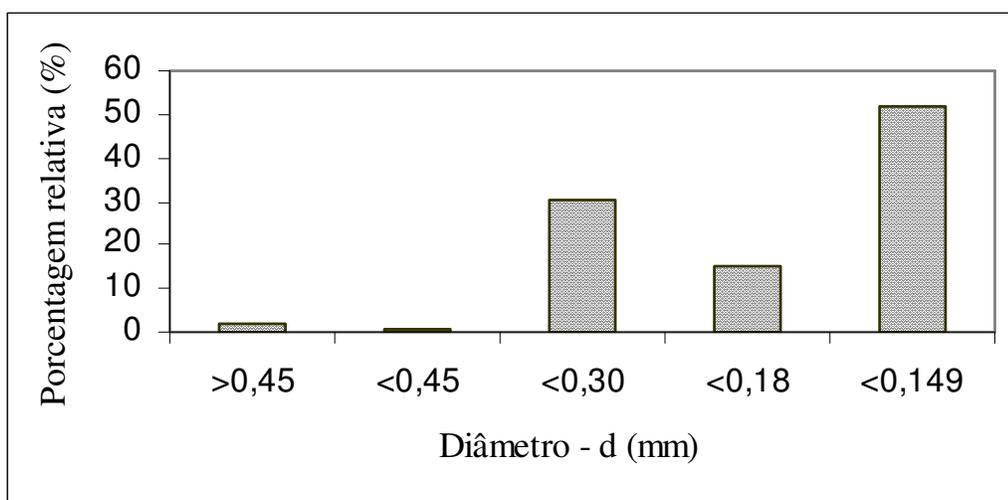
Q <sub>u</sub> (mL s <sup>-1</sup> )	Q <sub>o</sub> (mL s <sup>-1</sup> )	Q <sub>a</sub> (mL s <sup>-1</sup> )	[U] (g)	[O] (g)	[A] (g)
64,52	58,81	122,33	0,0284	0,0278	0,0288
24,45	89,65	114,10	0,0285	0,0302	0,0304
22,95	60,36	83,30	0,0287	0,0288	0,0316
29,61	83,62	113,23	0,0292	0,0283	0,0317
40,11	53,28	93,39	0,0290	0,0288	0,0292
47,85	42,52	90,36	0,0291	0,0291	0,0293
37,82	79,20	117,02	0,0285	0,0285	0,0290
86,03	31,51	117,54	0,0285	0,0284	0,0286

Cilliers and Harrison (1997) estudaram a separação de células microbiológicas de suspensões de culturas, usando um hidrociclone de 10 mm para quantificar a performance de separação destes equipamentos. A influência da geometria do hidrociclone na recuperação e proporção de concentração foi verificada. O aumento do diâmetro do vortex finder resultou em aumento da proporção da concentração e no decréscimo da recuperação de células. O aumento do spigot mostrou a tendência oposta.

Medronho et al (2005) estudou o efeito da separação de *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae* e células humanas (BHK-21) usando o hidrociclone modelo de Bradley. De acordo com o trabalho, hidrociclones modelo de Bradley com diâmetros abaixo de 10 mm não são eficientes para separar microorganismos, mas para a separação de células humanas um nível de 90% de eficiência foi alcançada.

#### **4.7 – Utilização de modelos de hidrociclone para concentração de partículas de carvão**

Os dados obtidos com a análise granulométrica das partículas de carvão utilizadas para a produção da solução de alimentação foram tabulados e agrupados na forma de distribuição cumulativa, igual ou menor que determinado tamanho (Figura 10). Inicialmente, fez-se os testes com a junção das partículas de carvão acumuladas nas 4 peneiras, o que causou entupimento do tudo do underflow. Portanto, para fins de testes, foram selecionadas somente as partículas retidas na peneira de menor diâmetro, ou seja, somente as partículas de carvão com diâmetro menor que 0,149 mm. Com essa granulometria não houve entupimento do equipamento.



**Figura 10:** Histograma com a porcentagem relativa das partículas de carvão com diferentes diâmetros, utilizadas para formar a suspensão de alimentação para os hidrociclones CM<sub>2</sub> e CM<sub>4</sub>.

A Tabela 15 representa os dados experimentais médios de desempenho do hidrociclone CM<sub>2</sub> operando com partículas de carvão, utilizando bomba centrífuga de 1 HP. Foram escolhidas três vazões volumétricas diferentes para alimentação, overflow e underflow 128,0 mLs<sup>-1</sup>, 43,67 mLs<sup>-1</sup> e 84,32 mLs<sup>-1</sup>; 106,05 mLs<sup>-1</sup>, 72,53 mLs<sup>-1</sup> e 33,52 mLs<sup>-1</sup>; 91,69 mLs<sup>-1</sup>, 53,93 mLs<sup>-1</sup> e 37,76 mLs<sup>-1</sup> respectivamente. A temperatura das emulsões variou entre 29°C e 31°C, durante os ensaios. A vazão volumétrica da alimentação corresponde ao somatório das vazões volumétricas do underflow e overflow. A E<sub>T</sub> variou de 0,333 a 0,433 e a R<sub>L</sub> variou de 0,315 a 0,410. Não houve diferença significativa entre a concentração de partículas de carvão no underflow, overflow e alimentação, portanto o hidrociclone CM<sub>2</sub> não foi eficiente no processo de separação de partículas de carvão de água.

**Tabela 15:** Dados médios da massa de partículas de carvão coletada nas amostras das correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>2</sub>) operando com suspensão de partículas de carvão em água (1,0 % p/v), alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mLs <sup>-1</sup> )	[U] (g)	[O] (g)	[A] (g)	$E_T$	$R_L$
84,32	43,67	127,99	0,0654	0,0538	0,0642	0,671	0,658
33,52	72,53	106,05	0,0677	0,0559	0,0642	0,333	0,315
37,76	53,93	91,69	0,0676	0,0517	0,0642	0,433	0,410

A Tabela 16 representa os dados experimentais médios de desempenho do hidrociclone CM<sub>4</sub> operando com suspensão de carvão para diferentes vazões volumétricas de alimentação, overflow e underflow que variaram, respectivamente, de 101,69 a 148,88 mLs<sup>-1</sup>, de 22,62 a 76,76 mLs<sup>-1</sup> e de 44,76 a 87,10 mLs<sup>-1</sup>. A temperatura das emulsões variou entre 29 e 31°C, durante os ensaios. A vazão volumétrica da alimentação corresponde ao somatório das vazões volumétricas do underflow e overflow.

**Tabela 16:** Dados médios da concentração de carvão, nas correntes de underflow [U], overflow [O] e alimentação [A], eficiência global  $E_T$  e razão de líquido  $R_L$  em diferentes ensaios experimentais realizados com o hidrociclone (CM<sub>4</sub>) operando com suspensão de partículas de carvão em água (1,0 % p/v), alimentado com bomba de 1 HP em diferentes vazões volumétricas de underflow ( $Q_u$ ), overflow ( $Q_o$ ) e alimentação ( $Q_a$ ).

$Q_u$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_o$ (mL s <sup>-1</sup> )	$Q_a$ (mLs <sup>-1</sup> )	[U] (g)	[O] (g)	[A] (g)	$E_T$	$R_L$
44,76	76,76	121,52	0,0746	0,0616	0,0707	0,389	0,367
59,60	44,53	104,13	0,0710	0,0559	0,0707	0,575	0,572
55,10	46,59	101,69	0,0626	0,0462	0,0718	0,472	0,547
87,10	22,62	109,72	0,0871	0,0523	0,0768	0,900	0,785
86,79	62,09	148,88	0,0396	0,0155	0,0318	0,726	0,578

Os hidrociclones CM<sub>2</sub> e CM<sub>4</sub> não atingiram boa eficiência global de separação das finas partículas de carvão. A eficiência variou de 0,333 a 0,671 (ver Tabela 15) e de 0,389 a 0,900 (ver Tabela 16) para os hidrociclones CM<sub>2</sub> e CM<sub>4</sub> respectivamente, com potência de alimentação de 1 HP. Pelas Tabelas 15 e 16 também é possível analisar o valor da razão de líquido ( $R_L$ ) em cada ensaio. A  $R_L$  variou de 0,315 a 0,6548 e de 0,367 a 0,785 para os hidrociclones CM<sub>2</sub> e CM<sub>4</sub>, respectivamente. Esse cálculo de eficiência global foi baseado na equação (10) apresentada anteriormente e conforme verificado por Castilho e Medronho (1992). Os hidrociclones são muito simples de construir, no entanto, é muito difícil prever seu desempenho utilizando apenas teoria e com esta equação não foi possível prever a real eficiência do equipamento.

Porém, conforme analisado, as diferenças de massa de carvão coletadas simultaneamente nos fluxos do underflow e overflow não apresentam grande diferença nos equipamentos empregados com a finalidade de separador de partículas sólidas de diâmetro menor que 0,180 mm.

Apesar da pequena diferença observada na diferença de massa nas correntes do overflow e underflow para os dois equipamentos, pode ser observado, nas Tabelas 15 e 16, que o hidrociclone CM<sub>4</sub> apresentou melhor eficiência de separação que o hidrociclone CM<sub>2</sub>, isso deveu-se à diferença de geometria entre os equipamentos. O hidrociclone CM<sub>4</sub> apresentou um menor diâmetro da porção cilíndrica que o hidrociclone CM<sub>2</sub>. Hidrociclones de pequenos diâmetros podem efetuar difíceis separações entre fases devido à grande força centrífuga gerada.

Não foi possível fazer uso da análise adimensional desenvolvida, pois os dados de eficiência global obtidos não apresentaram diferença significativa necessária para a obtenção das correlações.

## **5 - CONCLUSÃO**

Pela análise dos resultados experimentais apresentados e para as condições específicas de trabalho, temos as conclusões para aplicação dos diferentes modelos de equipamentos no tratamento de águas residuárias:

- ◆ Nos hidrociclones modelos  $CM_1$ , a concentração de óleo na saída do overflow foi maior que no underflow, contudo quando a vazão volumétrica do underflow é muito maior que a do overflow, a concentração de óleo na saída do underflow é maior que no overflow, pois o óleo acaba sendo forçado a sair pela região de vazão volumétrica maior.
- ◆ A eficiência global de separação do óleo emulsionado de água nos hidrociclones  $CM_1$  e  $CM_2$  operando sob condições de reciclo foi significativamente maior que no mesmo modelo de hidrociclone operando sem reciclo.
- ◆ A eficiência global de separação do óleo emulsionado de água no hidrociclone  $CM_2$  é significativamente maior que no hidrociclone  $CM_1$  sob as mesmas condições de operação, devido ao maior tempo de retenção do fluido no hidrociclone  $CM_2$ .
- ◆ O aumento da potência da bomba utilizada não resultou em aumento da eficiência global de separação do hidrociclone  $CM_2$ , que pode ser consequência da alta turbulência no interior do hidrociclone.
- ◆ O hidrociclone  $CM_3$  não apresentou diferença significativa de eficiência em relação ao modelo tradicional de Bradley.
- ◆ O hidrociclone  $CM_3$  apresentou eficiência global semelhante à do hidrociclone  $CM_2$  operando em sistema de reciclo, portanto, em relação ao  $CM_2$ , o hidrociclone  $CM_3$  foi um pouco mais eficiente.

- ◆ A eficiência global do hidrociclone modelo de Bradley foi maior que a dos hidrociclones CM<sub>1</sub> e CM<sub>2</sub> operando em mesmas condições.
- ◆ A eficiência global do hidrociclone CM<sub>4</sub> foi semelhante à apresentada pelo hidrociclone modelo de Bradley.
- ◆ Os hidrociclones estudados não foram eficiente para a separação de *Saccharomyces cerevisiae*.
- ◆ Os hidrociclones CM<sub>2</sub> e CM<sub>4</sub> não atingiram boa eficiência global de separação de partículas finas de carvão. Apesar da pequena diferença de massa nas correntes do overflow e underflow para os dois equipamentos, o hidrociclone CM<sub>4</sub> apresentou melhor eficiência de separação que o hidrociclone CM<sub>2</sub>, devido à diferença de geometria entre os equipamentos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Bergstrom, J.; Vomhoff, H. Review of experimental hydrocyclone flow field studies. **Separation and Purification Technology** (2006), doi: 10.1016/j.seppur.2006.09.019.
- Bradley, D.; Pulling, D. J. Flow patterns in the hydraulic cyclone and their interpretation in terms of terms of performance. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 37; p. 34–44, 1965.
- Braile, P. M. e Cavalcanti, J. E. W. A.. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 1 ed. São Paulo: CETESB, 1993. 764 p.
- CAMPOS, J. R.. **Alternativas para Tratamento de Esgotos – Pré-tratamento para águas de abastecimento**. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias do Rio Piracicaba e Capivari, 1994. 112 p.
- Castilho, L.R.; Medronho, R. A. Uma comparação entre as famílias de Hidrociclones. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2., 891 – 899 p., 1995, Maringá. **Anais do XXIII Congresso brasileiro de Sistemas Particulados**. Maringá: UEM, 1995.
- Castilho, L.R; Medronho, R.A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. **Minerals Engineering**, v. 13, n. 2, p. 183-191, 2000.
- Chaves, A.P. et al. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**, vol.1, 1 edição, Signus Editora Ltda - SP, 1996.
- Chen, W.; Zydek, N.; Parma, F. Evaluation of hydrocyclone models for practical applications. **Chemical Engineering Journal**, vol. 80 (1–3), p. 295–303, 2000.
- Cheryan, M.; Rajagopalan, N. Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. **Journal of Membrane Science** (151), p. 13-28, 1998.
- Chu, Liang-Yin; Chen, Wen-Mei and Lee, Xiao-Zhong. Effect of structural modification on hydrocyclone performance. **Separation and Purification Technology**, v. 21, p. 71–86, 2000.

- Cilliers, J.J.; Harrison, S.T. L. The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions. **The Chemical Engineering Journal**, vol. 65, n.1, p. 21-26, 1997.
- Cilliers, J.J.; Diaz-Anadon, L.; Wee, F. S. Temperature, classification and dewatering in 10 mm hydrocyclones. *Minerals Engineering*, 2004, 17, 591-597.
- Couto, H. J. B.; Massarani, G. Tratamento de efluente oleoso através da flotação por ar dissolvido: operação em batelada. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA e II CONGRESSO BRASILEIRO DE TERMODINÂMICA APLICADA, 2004, Rio de Janeiro. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química e II Congresso Brasileiro de Termodinâmica Aplicada**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004.
- Dai, G.Q.; Chen, W.M.; Li, J.M.; Chu, L.Y. Experimental study of solid-liquid two-phase flow in a hydrocyclone. **Chemical Engineering Journal**, v.74, p. 211-216, 1999.
- Delfos, R. A. et al. A design tool for optimising axial liquid-liquid hydrocyclones. **Minerals Engineering**, vol.17, p. 721 – 731, 2004.
- Fehr, M.; Cloutier, L. Critérios de SCALE-UP para Hidrociclones. **Revista Brasileira de Tecnologia**, v.11, p. 279 – 288, 1980.
- Gomide, R. **Operações Unitárias**, vol. 3, Separações mecânicas, cap. 3, 1980.
- Imhoff, K. R.. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias**. Tradução a 26<sup>a</sup> ed alemã por Max Lothar Hess. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002 (3<sup>a</sup> reimpressão). 301 p.
- Jirum, X; Qian, L e Jicun, Q. Studying the flow field in a hydrocyclone with no forced vortex. Part I: Average velocity. **Filtration and Separation**, vol., pag. 276 – 278, 1990.
- Lima, G.S; Pereira, C.M. S; Massarani, G. Análise do desempenho de mini hidrociclones. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2., 1996, Uberlândia. **Anais do XXIV Congresso Brasileiro de sistemas particulados**. Uberlândia: UFU, 1996.

- Matta, V. M.; Medronho, R. A. The new method for yeast recovery in batch ethanol fermentations: Filter aid filtration followed by separation of yeast from filter aid using hydrocyclones. **Bioseparation**, vol. 9, p. 43–53, 2000.
- Medronho, R.A. **Scale-Up of Hydrocyclones at Low Feed Concentrations**. Inglaterra, 1984. 323 p. Thesis (Ph.D.) - University of Bradford, United Kingdom.
- Medronho, R. A.; Schuetze, J.; Deckwer, W. D. Numerical Simulation of Hydrocyclones for Cell Separation. **Latin American Applied Research**, vol. 35, pag. 1 - 8, 2005.
- Metcalf e Eddy. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.
- Pai Neto, E. D.; Valente, M.; Cardoso, V.L.; Damasceno, J.J.R. Análise do desempenho em hidrociclones com fundo chato. In: XIX INTERAMERICAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING, 19., e CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., Águas de São Pedro, 2000. Proceedings, 13., e 19., Águas de São Pedro: UNICAMP, 2000.
- Pai Neto, E. D.; Valente, M.; Cardoso, V.L.; Damasceno, J.J.R. Análise do Desempenho de Hidrociclone de Fundo Chato. Faculdade de Engenharia Química. Universidades Federais de Uberlândia, 2002. Disponível em: <<http://www.deq.uem.br/biblioteca/deq/Anais/CobeqXIII/pdf/151.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2005.
- Park, J. H. Jo, Y. M. e Oh, J. M. **Classification of lake sediments using a hydrocyclone**. Water Science and Technology, vol. 47, n 47, p. 277-281, 2002.
- Pereira, C.M.S.; Massarani, G. Separação sólido-fluido não newtoniano em hidrociclones. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2., p. 719 – 726, 1995, Maringá. **Anais do XXIII Congresso Brasileiro de sistemas particulados**. Maringá: UEM, 1995.
- Petty, C.A; Parks, S.M. Flow structures within miniature hydrocyclones. **Minerals Engineering**, vol.17, p. 615-624, 2004.

- Ramalho, R. S. **Introduction to Wastewater Treatment Processes**. 2 ed. New York: Academic Press, 1983. 580 p.
- Rietema, K. Performance and design of hydrocyclones - Parts I to IV, **Chemical Engineering Science**, v. 15, 1961.
- Rickwood, D.; J. Onions, B. Bendixen; I. Smyth. Prospects for the Use of Hydrocyclones for Biological Separations. In: Svarovsky L. and M.T. Thew (eds.), **Hydrocyclones: Analysis and Applications**, Kluwer, Dordrecht, 109-119 (1992).
- Schiavolin, M.. **Processos de Tratamento de Efluentes Aquosos: da Compilação de Técnicas Existentes a Estudos de Casos**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2001. 130 p.
- Silva, M.A.P. **Hidroclones de Bradley: dimensionamento e análise do desempenho**. Rio de Janeiro, 1989. 81p. Dissertação (M.S.) – Coordenação de Pós-graduação e pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Socol, O. J. **Construção e Avaliação de Hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**, Piracicaba, 2003. 89p. Dissertação (D.S.) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz/USP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-07042003-160009/publico/olivio.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2005.
- Svarovsky, L. **Solid-Liquid Separation**. 3 ed. Lodon: Butterworths, 1990. 716 p.
- Von Sperling, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, edição 2, v.1, p. 243, 1996.
- Wesson, G. D., Petty, C. A. Process engineering of produced water treatment facility based on hydrocyclone technology. In: **Proceedings of the International Petroleum Environmental Conference**, Houston, 2-4 March, p.110, 1994.
- Yang, B. S. Industrial Processes and waste characterization. In: **Resources, conservation and recycling**. Vol. 16, 1996. p. 93-112

Yuan, H., D. Rickwood, I.C. Smyth, and M.T. Thew. An Investigation into the possible use of hydrocyclones for the removal of yeast from beer. **Bioseparation** 6, 159-163, 1996a.

Yuan H., M.T. Thew and D. Rickwood. Separation of Yeast with Hydrocyclones. In: Claxton D., L. Svarovsky and M.T. Thew (eds.), Hydrocyclones'96, **Mechanical Engineering Publications**, London & Bury Saint Edmunds, 135-149 (1996b).