



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

GRAZIELE SANTOS ROCHA

**USOS E APLICAÇÕES DO HIDROCICLONE NOS CAMPOS
INDUSTRIAIS**

MARABÁ-PA
2010

GRAZIELE SANTOS ROCHA

USOS E APLICAÇÕES DO HIDROCICLONE NOS CAMPOS INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva

MARABÁ-PA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II do CAMAR/UFPA, Marabá, PA

Rocha, Grazielle Santos

Usos e aplicações do hidrociclone nos campos industriais /
Grazielle Santos Rocha ; orientador, Reginaldo Sabóia de Paiva.
— 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de
Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2010.

1. Beneficiamento de minério. 2. Separação (Tecnologia). 3.
Partículas (física, química, etc.). 4. Indústria. I. Paiva, Reginaldo
Sabóia de, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 622.7

GRAZIELE SANTOS ROCHA

USOS E APLICAÇÕES DO HIDROCICLONE NOS CAMPOS INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Data de aprovação: 23/08/2010

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Lucinewton Silva Moura
Universidade Federal do Pará

Prof. Diego Raniere Nunes Lima.
Universidade Federal do Pará

MARABÁ – PA

2010

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tem me dado, saúde, sabedoria, presteza, oportunidades, sem nunca pedir nada além das minhas possibilidades, Também sou grata por me guiar, encorajar e proteger.

Ao professor Reginaldo Sabóia, pela orientação, pelo profissionalismo dirigido à elaboração deste, bem como pela sua amizade durante todo o período acadêmico.

A todos os meus colegas de curso, em especial (para não criar confusão cito em ordem alfabética) Ana Carla, Ariadne, Eduardo, Fernando, Francinere, George, Jardel, Larison, Luís, Maria Emília, Mirian, Nonato Hugo, Romero e Wanderley, pela amizade, caronas, experiências acadêmicas e pelos agradáveis momentos.

Ao Todos os meus amigos da Casa de Estudante, em especial a Juliete, pois, por várias vezes foi solidaria e me emprestou o seu notebook.

Não poderia deixar de agradecer a Silvaneto, Janete, Marcela e Áquila, família que me acolheu no início desta minha caminhada rumo a universidade.

Ao meu namorado Inaldo Filho, pelo incentivo, companheirismo, amor e amizade, pelo ombro forte o qual eu pude me apoiar durante toda a elaboração deste trabalho, sendo assim basicamente, um co-orientador.

Agradeço também aos meus anjos: minha mãe Maria Dalva, meu pai Gidalvo, minha irmã Glaudielly e a tia Rose Meire, por terem acreditado em meu potencial, por todo o apoio, dedicação, amor, paciência, pela força dispensada nos momentos difíceis, por sempre me incentivar a prosseguir.

Enfim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra fizeram parte da concretização de mais esta etapa da minha vida.

EPÍGRAFE

*“Crescer significa mudar e mudar envolve riscos,
uma passagem do conhecido para o desconhecido.”*
(Autor desconhecido)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi fazer um levantamento das aplicações do equipamento de hidrociclonagem nos campos industriais. Os hidrociclones, quando utilizados na planta de beneficiamento mineral, têm a função de separar, classificar, pré-concentrar, reaproveitar parte do minério antes deste ser descartado, de forma que essa parcela possa ser reprocessada durante o beneficiamento. Mas na atualidade, o hidrociclone vem ganhando usos nos diversos setores industriais, tais como, têxtil, alimentício, químico, petroquímico, metalúrgico, siderúrgico, tratamento de água, ambiental e também são empregados nas operações unitárias de separação de sólido-líquido. Este trabalho apresenta aplicações do hidrociclone nos diversos campos, levantando também as vantagens da utilização deste equipamento.

Palavras chave: Hidrociclone, separação sólido-líquido, classificação, beneficiamento mineral.

ABSTRACT

This work will make a survey of applications in industrial fields hidrociclone equipment hydrocyclones industrial sectors. The hydrocyclones, when used in the processing plant miniraly, have the function of separating, sorting, pre-concentrate, reuse of the ore before it is discarded, so that portion can be reprocessed during processing. But in actuality, the hydrocyclone is gaining use in various industrial sectors such as textile, food, chemical, petrochemical, metallurgy, steel, water treatment, environmental and unit operations are employed in the solid-liquid separation. This paper presents applications of the hydrocyclone in the various fields, raising the merits of using this equipment.

Keywords: Hydrocyclone, solid-liquid separation, classification, processing miniraly

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Representação esquemática de um hidrociclone convencional	16
Figura 2	Representação de um hidrociclone em operação	18
Figura 3	Diagramas ilustrativos de formas de descargas do <i>underflow</i> do hidrociclone	20
Figura 4	Bateria de hidrociclone	21
Figura 5	Baterias de hidrociclones	22
Figura 6	Curvas de partição típicas de hidrociclone.	30
Figura 7	Influência do aumento de α na curva padrão de partição.	37
Figura 8	Bateria de hidrociclone da Mina do Sossego	42
Figura 9	Hidrociclone concentrador	44
Figura 10	Esquema de um ciclone classificador e dois tipos de ciclone concentradores	44
Figura 11	Modelo de utilização de hidrociclonagem na barragem de rejeitos	46
Figura 12	Desempenho esquemático de um hidrociclone	48
Figura 13	Hidrociclone construído pela empresa GALLO irrigações e equipamentos agrícolas	51
Figura 14	Bateria de hidrociclones	52
Figura 15	Hidrociclone	52
Figura 16	Hidrociclone utilizado na recuperação de areias	55
Figura 17	Hidrociclone utilizado na lavra de areias	56
Figura 18	Hidrociclonagem na recuperação de areias finas	56

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{vu} - concentração volumétrica no “underflow”, adimensional; e

C_{va} - concentração volumétrica na alimentação, adimensional.

C_{wa} - concentração mássica na alimentação, adimensional;

C_{wu} - concentração mássica no “underflow”, adimensional;

d'_{50} - diâmetro de corte reduzido, m;

D_c - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, m;

$\frac{dX_U}{dX_A}$ - razão da derivada da distribuição granulométrica na corrente do “underflow” e a distribuição granulométrica na corrente de alimentação.

E_u - número de Euler, adimensional;

ET - eficiência total, adimensional;

ET' - eficiência total reduzida, adimensional;

H_f - perda de carga, m.

$\frac{P_1}{\gamma}$ e $\frac{P_2}{\gamma}$ - cargas piezométricas, m;

Q_a - vazão de alimentação, $m^3 s^{-1}$;

Q_u - vazão volumétrica no “underflow”, $L s^{-1}$;

Re_y - número de Reynolds, adimensional;

RL - razão de líquido, adimensional;

Stk_{50} - número de Stokes, adimensional;

$\frac{V_1^2}{2g}$ e $\frac{V_2^2}{2g}$ - cargas cinéticas, m;

V_c - velocidade da suspensão, baseada na seção cilíndrica do hidrociclone, $m s^{-1}$;

W_a - vazão de massa na alimentação, $kg s^{-1}$.

W_u - vazão de massa no “underflow”, $kg s^{-1}$; e

W_{sa} - vazão mássica de sólidos na alimentação, $kg s^{-1}$;

W_{su} - vazão mássica de sólidos recuperados no “underflow”, $kg s^{-1}$;

ρ - densidade da suspensão, $kg m^{-3}$;

ρ_s - densidade do sólido, $kg m^{-3}$;

μ - viscosidade dinâmica do líquido, $kg m^{-1} s^{-1}$;

ΔP - diferencial de pressão entre as correntes de alimentação e do “overflow”, Pa.

Z_1 e Z_2 - cargas geométricas, m; e

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO.....	15
1.1.1. Geral.....	15
1.1.2. Específicos.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 HIDROCICLONE.....	16
2.1.1 Famílias de hidrociclones.....	17
2.1.2 Funcionamento básico do hidrociclone.....	18
2.1.3 Separação sólido-líquido em hidrociclones.....	23
2.1.3.1 Eficiência de separação sólido-líquido.....	24
2.1.3.2 Eficiência total (ET).....	24
2.1.3.3 Eficiência total (ET').....	25
2.1.3.4 Diâmetro de Corte (d ₅₀).....	26
2.1.3.5 Diâmetro de corte reduzido (d'50).....	27
2.1.3.6 Grupos adimensionais.....	27
2.1.3.7 Perda de carga.....	29
2.1.3.8 Perda de carga em hidrociclones.....	30
2.1.4 Modelagem da partição de ciclones	30
2.1.4.1 Modelo de Lynch e Rao	31
2.1.4.1.1 <i>Curva de partição</i>	32
2.1.4.1.2 <i>d₅₀ corrigido</i>	33
2.1.4.1.3 <i>Relação pressão-vazão</i>	34
2.1.4.1.4 <i>Partição de água</i>	35
2.1.4.2 Modelo de Plitt	35
2.1.4.2.1 <i>Curva de partição</i>	36
2.1.4.2.2 <i>Vazão</i>	37
2.1.4.2.3 <i>Calculo do by pass</i>	37
2.1.5 Influencia dos parâmetros na classificação por hidrociclone....	39
3. METODOLOGIA	41
4. USOS E APLICAÇÕES DOS HIDROCICLONES.....	42
4.1 MINERAÇÃO.....	42
4.1.1 Classificação.....	42

4.1.2 Espessamento.....	43
4.1.3 Deslamagem.....	44
4.1.4 Pré-concentração.....	44
4.1.5 Barragem de rejeito.....	46
4.2 INDÚSTRIA PETROLÍFERA.....	47
4.3 AGRICULTURA.....	50
4.4 LIMPEZA.....	52
4.5 TÊXTIL.....	54
4.6 QUÍMICO.....	54
4.7 TRATAMENTO DE ÁGUA.....	55
4.8 PURIFICAÇÃO.....	56
4.9 RECUPERAÇÃO DE AREIS.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1 AS VANTAGENS DOS USOS E APLICAÇÕES DOS HIDROCICLONES	58
6. CONCLUSÃO.....	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

Os Hidrociclones são separadores em campo centrífugos vastamente usados no setor industrial. Compõe, portanto, um importante grupo de equipamentos designados à separação sólido-líquido e líquido-líquido aplicados aos mais diferentes campos industriais (SOUZA; NETO; BARROZO, 2000).

Devido ao fato de não terem partes móveis, estes equipamentos apresentam um dos meios mais baratos de separação do ponto de vista de operação e de investimento (SOUZA; NETO; BARROZO, 2000).

Os Hidrociclones foram patenteados em meio do fim do século XIX e durante determinadas décadas ficaram com o uso pouco difundido, restritos somente a algumas atividades como, por exemplo, na remoção de areia de águas. No entanto, pouco antes da metade do século XX este argumento começou a se alterar, quando os Hidrociclones começaram a ser empregados na indústria de extração e processamento minerais o que despertou o interesse de pesquisadores, induzindo a inúmeros estudos científicos com essa modalidade de separadores (VIEIRA, 2001).

Em virtude desses estudos, foram aparecendo diversas formas de Hidrociclones (*famílias*) as quais se fundamentavam nas relações geométricas dentre as fundamentais dimensões do Hidrociclone com o diâmetro de sua parte cilíndrica. Esses estudos, devido à ampla dificuldade de se descobrir soluções analíticas e numéricas para as equações da circulação e dos prosseguimentos aplicados ao escoamento no interior do equipamento, basearam-se sobretudo em modelos empíricos e semi-empíricos para predição de projeto e desempenho de Hidrociclones (VIEIRA;BARROZO;DAMASCENO, 2005).

A aplicação de alguma determinada família de Hidrociclones em um procedimento depende da precisão de equipamentos com um elevado poder classificador (aperfeiçoado no tamanho das partículas recolhidas no underflow) ou com amplo poder concentrador. É em resultado da considerável versatilidade que os

Hidrociclones são dotados, porque se consente a aplicação destes equipamentos nos mais alterados procedimentos de separação sólida líquido, tais como: a categorização seletiva, a deslamagem, o adensamento, o fracionamento, a pré-concentração, a recuperação de líquidos etc (SILVA; MEDRONHO, 1988).

Este trabalho tem como importância a divulgação da vasta utilização do equipamento hidrociclone, despertando assim o interesse para estudos mais detalhados sobre cada aplicação deste equipamento, buscando melhorar a sua eficiência. Visto que, outrora este equipamento fora utilizado basicamente na extração de areia e água, mas na atualidade vem sendo empregado nos mais diversificados campos.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Geral

O objetivo principal deste estudo é levantar os principais usos e aplicações do hidrociclones no setor industrial.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos desse estudo foram:

- Descrever os principais usos e aplicações dos hidrociclones.
- Identificar as vantagens dos usos e aplicações dos hidrociclones nos diversos campos industriais
- Elaborar um trabalho que sirva como fonte de estudo sobre o assunto e como ponto de partida para estudos mais detalhados nos diversos campos de aplicação do equipamento hidrociclone.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HIDROCICLONE

O hidrociclone, que também é denominado de ciclone hidráulico, ciclone de líquidos, hidroclone, cone de separação e separadores centrífugos, é um importante equipamento destinado principalmente para separação sólido-líquido (SOCCOL, 2003).

Eles têm grande aplicação na classificação de partículas com diâmetros na faixa de 5 a 200 μm , sendo utilizados em dois processos extremos que são a clarificação e o desaguamento. No espessamento, os hidrociclones são usados em substituição aos espessadores gravitacionais, embora produzindo *underflow* com concentrações mais baixas (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

A primeira patente do hidrociclone data por volta do final do século XIX, por algum tempo o uso do hidrociclone ficou restrito a extração de areia e de água. A partir da 2ª Guerra Mundial o hidrociclone passa a ser visto como um importante equipamento de separação, pelo “Dutch State Mines Department” na Holanda, tendo grande aplicabilidade na extração e processamento de minérios (SILVÉRIO; VIEIRA; BARROZO, 2005).

Eles são equipamentos conceitualmente classificadores, recebem uma alimentação que separa em duas populações, *underflow* que concentra a maior parte de partículas grossas e o *overflow* que engloba a maior parte das partículas finas (CHAVES, 2006).

Segundo Vieira (2006) os hidrociclones são simples e fáceis para construir. Na Figura 1 é apresentado um hidrociclone convencional, constitui basicamente de um segmento cilíndrico acoplado em uma parte cônica. Sendo que a parte cilíndrica possui uma entrada tangencial por onde é feita a alimentação e um tubo coaxial denominado de *vortex finder*, por onde é descarregado o *overflow*.

Já na parte cônica possui um orifício inferior denominado de *apex*, por onde é descarregado o *underflow* (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

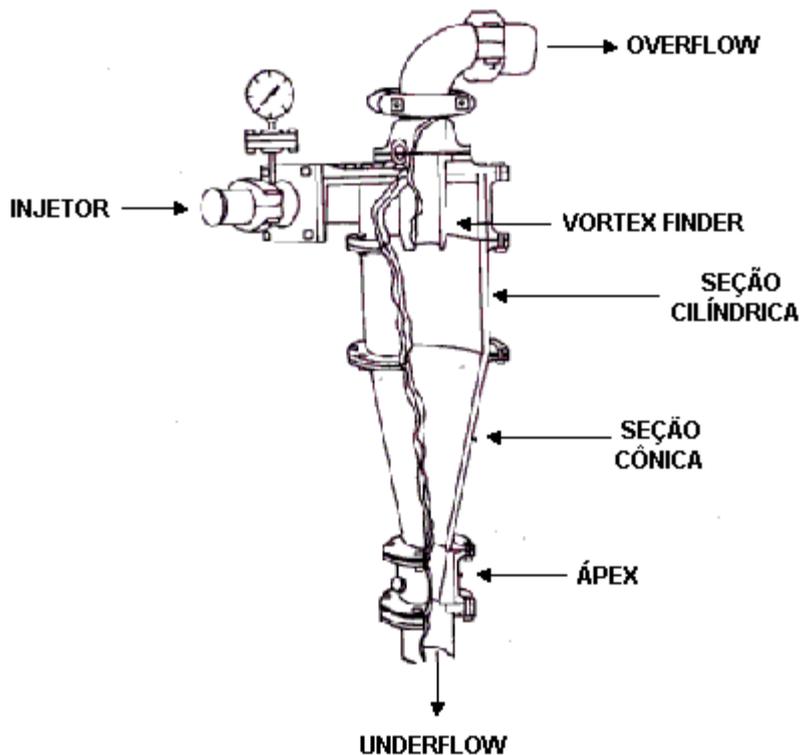


Figura 1 - Representação esquemática de um hidrociclone convencional.
Fonte: LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA (2004).

2.1.1 Famílias de hidrociclones

Os hidrociclones são agrupados em famílias, que possui como principal característica a sua geometria associada com o diâmetro da parte cilíndrica. A utilização de uma determinada família geralmente está ligada à necessidade de equipamento com alto poder classificador ou poder concentrador (INES; CRUZ, [200-]).

A família dos hidrociclones com a parte cilíndrica relativamente grande é dotados de maior capacidade de processamento, porém, os que têm maior altura na parte cônica induzem a uma maior eficiência na coleta. Diante disso, encontra-se um grande número de famílias de hidrociclones, dentre as famílias de maior interesse

técnico-científico estão: “Bradley”, “Krebs” e “Rietema” (SVAROVSKY apud LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). As principais razões geométricas que se refere a estas famílias de hidrociclones são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Razões entre as principais relações geométricas de três dos grupos de Hidrociclone.

Hidrociclone	Da/Dc	Do/Dc	I/Dc	L/Dc	θ
RIETEMA	0,280	0,340	0,400	5,000	15 - 20,0 ^º
BRADLEY	0,133	0,200	0,330	6,850	9,0 ^º
DEMCO I	0,217	0,500	1,000	4,700	25,0 ^º
DEMCO II	0,244	0,313	0,833	3,900	20,0 ^º
KREBS	0,267	0,159	-	5,874	12,7 ^º
MOSLEY I	0,154	0,214	0,571	7,430	6,0 ^º
MOSLEY II	0,160	0,250	0,571	7,710	6,0 ^º
AKW	0,200	0,320	0,800	6,240	15,0 ^º

Dc = Diâmetro da região cilíndrica; Da = Diâmetro do duto de alimentação; Do = Diâmetro do duto do “overflow”; I = Comprimento do duto do “overflow” no interior do equipamento; L = Comprimento total do hidrociclone; θ = Ângulo da região cônica.

Fonte: CRUZ (2008)

O diâmetro da parte cilíndrica (Dc) de um hidrociclone é definido em função do diâmetro das partículas que se pretende separar. O autor apresenta na Tabela 2, sugestões de diâmetro de hidrociclones para diferentes diâmetros de partículas (CRUZ, 2008).

Tabela 2. Diâmetro de hidrociclones para diferentes diâmetros de partículas.

Diâmetro do hidrociclone (Dc) (cm)	Diâmetro de partículas (μm)
0,63 - 1,27	2 - 10
1,27 - 10,16	10 - 20
10,16 - 30,48	20 - 60
40,64 - 76,20	60 - 70

FONTE: CRUZ (2008)

2.1.2 Funcionamento básico do hidrociclone

Os hidrociclones utilizam a sedimentação centrífuga como princípio de separação, em que as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca sua separação do fluido (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

A alimentação da suspensão, sob pressão, é feita tangencialmente no topo da câmara cilíndrica do hidrociclone, provocando um movimento rotacional. Esse movimento em seu percurso gera acelerações centrífugas diretamente

atuantes nas partículas presentes no meio, forçando-as a moverem-se em direção à parede do equipamento (SILVÉRIO; VIEIRA; BARROZO, 2005).

Estas partículas estão sujeitas a duas velocidades, além da velocidade de escoamento, a centrífuga que tem como tendência arrastá-las para as regiões periféricas do equipamento e a outra de direção vertical, por causa do movimento da água no interior do hidrociclone: na região próxima a periferia, onde a massa da polpa está sendo descarregada pelo *underflow* o sentido é descendente, já na região do central, onde a polpa está sendo descarregada pelo *overflow* o sentido é ascendente como ilustra na Figura 2 (CHAVES, 2006).

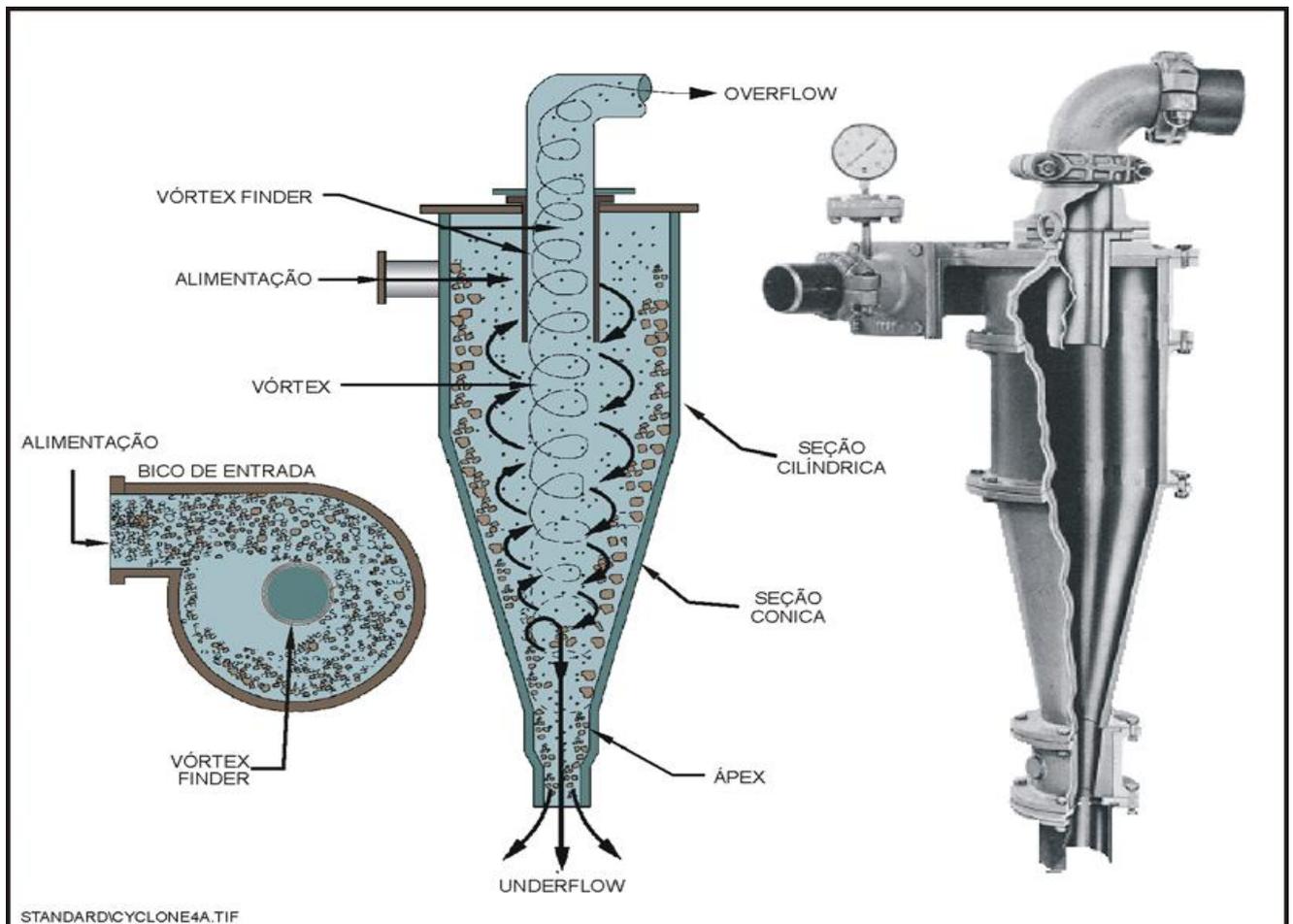


Figura 2 - Representação de um hidrociclone em operação.
Fonte: VALE (2007).

Quando as partículas chegam junto à parede, elas sofrem a ação do atrito, pois entram em contato uma com as outras, perdendo a velocidade. Pelo

vórtice descendente e pela ação da gravidade são arrastadas para baixo, e descarregados pelo *apex*, constituindo o *underflow* (CHAVES, 2006).

Já as partículas mais finas, menos densas e grande parte da fase líquida são dirigidas para o interior do hidrociclone, até encontrar um fluxo ascendente em direção em ao *vortex finder*, e são arrastados e descarregados, constituindo o *overflow* (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

Estes dois fluxos verticais, ascendentes e descendentes, fazem supor que exista um lugar geométrico onde a velocidade vertical é nula, mas partículas continuam girando no sentido do fluxo rotacional (horizontal). Este lugar é na ligação do cilindro com o cone, denominada manto (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

CHAVES (2006) “As partículas externas a este manto descarregam via *underflow*. As partículas internas via *overflow*”. As partículas que estão nessa ligação cilindro-cone estão sujeitas de maneira equilibrada à ação da força centrífuga e ao empuxo das partículas mais pesadas que as empurram na direção do *vortex finder*. Tendo assim, chances iguais de descarregar pelo *underflow* ou pelo *overflow*.

O hidrociclone requer altas velocidades de polpa para gerar as forças centrífugas internas necessárias para o seu funcionamento adequado. As velocidades altas implicam em elevada resistência ao fluxo, e por isso a alimentação precisa ser pressurizada. A densidade da polpa de alimentação, a pressão de alimentação e os diâmetros das saídas no *ápex* e no *vórtex finder* determinam a eficiência de separação e também a granulometria abaixo da qual as partículas tendem a sair pelo *overflow* (tamanho de corte). Quando os sólidos são conduzidos para o *ápex*, a força centrífuga tende a fazê-los girar, de maneira que os sólidos saem pelo *ápex* expandindo e dispersando na forma cônica como mostra na Figura 3 (VALE, 2007).

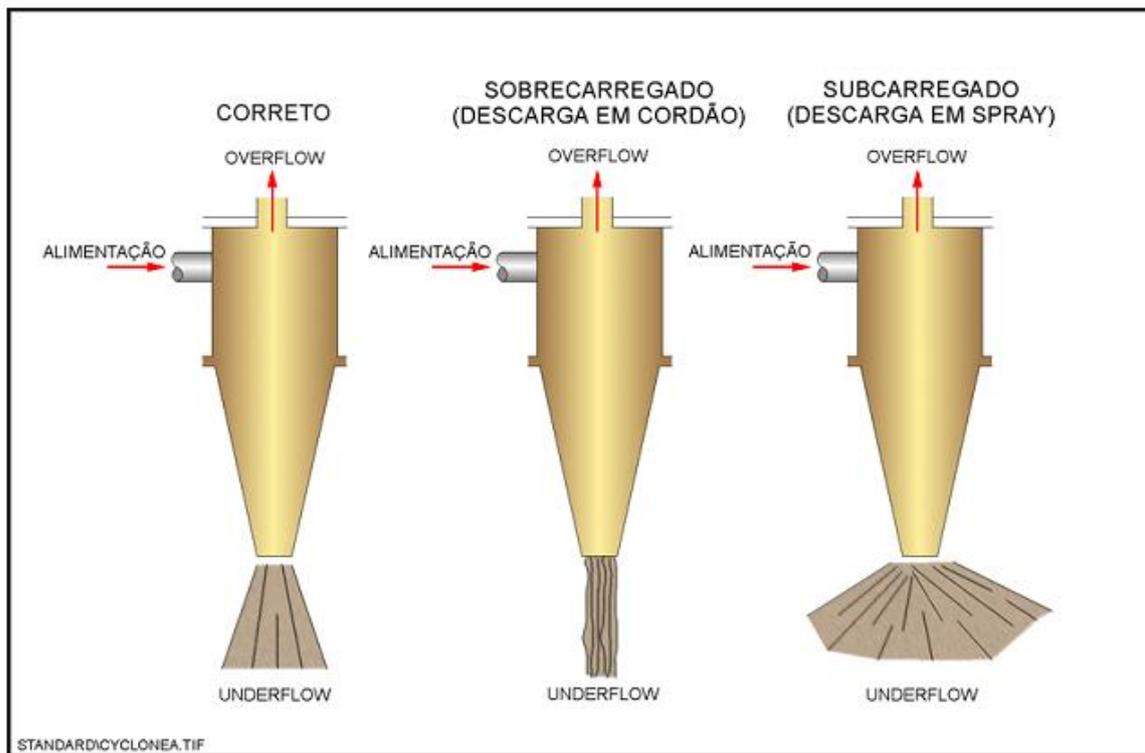


Figura 3 – Diagramas ilustrativos de formas de descarga do *underflow* do hidrociclone.
Fonte: VALE, (2007)

Quando a taxa de alimentação, a pressão e/ou a densidade da polpa que entra no hidrociclone diminuem, as forças que atuam para baixo na polpa tornam-se pequenas em relação às forças centrífugas dentro do hidrociclone, e o ângulo de dispersão aumenta, resultando em um *overflow* com tamanho de partículas mais fino. Este fenômeno é chamado “descarga em spray”. Por outro lado, quando a taxa de alimentação e a pressão aumentam, o ângulo de dispersão diminui. As forças de separação centrífugas são relativamente baixas quando um baixo ângulo de dispersão indica uma baixa eficiência do hidrociclone. Mas, quando o Hidrociclone é sobrecarregado excessivamente a polpa desce verticalmente do *ápex* em forma de cordão (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

A descarga em cordão indica que o *vórtex* já não existe mais; a coluna central de ar não existe. Neste caso, o hidrociclone não está mais classificando adequadamente a alimentação. Quando o hidrociclone opera conforme projetado, o ângulo de descarga se assemelha ao ângulo da parte cônica do hidrociclone, que é posição adequada à classificação (VALE, 2007).

Os hidrociclones são dispostos, convenientemente instalados na poção mais alta da usina, visto que já é necessário o uso de bombeamento, de maneira que a alimentação dos demais equipamentos possam ser feitas por gravidade. Para economizar espaço e assegurar uma distribuição uniforme da alimentação dos hidrociclones eles estão arranjados em baterias, em um distribuidor chamado “*manifold*” (distribuidor) sendo conhecido na mineração de “*aranha*” representada na Figura 4 (CHAVES, 2006).



Figura 4 – Bateria de hidrociclone.
Fonte: www.rochemt.com.br/imagens/cyclone1.jpg

A polpa de alimentação entra pelo fundo de um distribuidor cilíndrico, em torno do qual saem radialmente os tubos que alimentam os hidrociclones. É possível abrir ou fechar individualmente as válvulas de alimentação dos hidrociclones. O *underflow* da bateria de hidrociclones é coletado em uma calha circular instalada em volta da tubulação de alimentação. Outra calha circular coleta o *overflow* (VALE, 2007).

O distribuidor (aranha) Figura 5 é projetada prevendo o local para hidrociclones de reserva e procura-se usar um número par de hidrociclones, de maneira que permita sempre a distribuição radial e a simetria do fluxo da alimentação. Pois quando for necessário desligar a alimentação de um determinado hidrociclone, por exemplo, a necessidade de manutenção, o hidrociclone radialmente simétrico a ele também deve ser desligado, e ligados os outros dois hidrociclones reservas, também radialmente opostos entre eles, Sendo assim, fica sempre mantida a simetria do conjunto em operação (CHAVES, 2006).



Figura 5 - Baterias de hidrociclones
Fonte: VALE (2007)

2.1.3 Separação sólido-líquido em hidrociclones

VIEIRA (2006) afirma que apesar da simplicidade de construção, operação e manutenção de um hidrociclone, a avaliação e a descrição da separação de sólido-líquido são complexas do ponto de vista matemático. Sendo assim, para a avaliação da eficiência na separação de sólido-líquido, normalmente, são utilizadas formulações empíricas. Já para descrição do equipamento ressalta-se a relevância que os grupos adimensionais desempenham no processo de separação.

2.1.3.1 Eficiência de separação sólido-líquido

Segundo SILVA & MEDRONHO (1988) a eficiência de separação de partículas em um hidrociclone depende da geometria do mesmo, das propriedades físicas do sólido e do fluido e das condições de operação. Eles, ainda relatam que as principais variáveis associadas ao estudo do desempenho dos hidrociclones são: a eficiência total (ET) e a eficiência total reduzida (ET').

2.1.3.2 Eficiência total (ET)

A eficiência total do hidrociclone é definida pela razão entre a massa total de sólidos coletados no concentrado (“underflow”) e a massa total de sólidos coletados na alimentação, sendo calculada pela Equação 1 (CRUZ, 2008).

$$ET = \frac{W_{su}}{W_{sa}} \rightarrow ET = \frac{C_{wu}W_u}{C_{wa}W_a}$$

Equação 1

Onde:

ET - eficiência total, adimensional;

Wsu - vazão mássica de sólidos recuperados no “underflow”, kg s⁻¹;

Wsa - vazão mássica de sólidos na alimentação, kg s⁻¹;

Cwu - concentração mássica no “underflow”, adimensional;

Cwa - concentração mássica na alimentação, adimensional;

Wu - vazão de massa no “underflow”, kg s⁻¹; e

Wa - vazão de massa na alimentação, kg s⁻¹.

Segundo SILVA (1989), no hidrociclone, parte da massa sólida não é separada devido à ação centrífuga, pois o equipamento também age como um divisor do escoamento, tal como uma conexão “T” em tubulações, ou seja, a corrente inicialmente alimentada dá origem às outras correntes: do “underflow” e do

“overflow”. A esse fenômeno dá-se a denominação de “efeito T”, correlacionando-o diretamente com a razão de líquido (RL). A razão de líquido relaciona a vazão volumétrica do fluído que sai na corrente do “underflow” e a que entra na corrente de alimentação, conforme mostra a Equação 2.

$$RL = \frac{Q_u(1 - C_{vu})}{Q_a(1 - C_{va})}$$

Equação 2

Onde:

RL - razão de líquido, adimensional;

Qu - vazão volumétrica no “underflow”, L s⁻¹;

Qa - vazão volumétrica na alimentação, L s⁻¹;

Cvu - concentração volumétrica no “underflow”, adimensional; e

Cva - concentração volumétrica na alimentação, adimensional.

2.1.3.3 Eficiência total reduzida (ET')

Enquanto a eficiência total considera todas as partículas coletadas no “underflow”, independentemente do que os levou a serem separadas, a eficiência total reduzida admite apenas aquelas coletadas no “underflow” pelo efeito do campo centrífugo. Desta forma, a influência da divisão de fluxo (efeito T) deve ser desconsiderada e subtraída da eficiência total (ET). Para quantificação deste parâmetro utiliza-se a Equação 3 (CRUZ, 2008).

$$ET' = \frac{ET - RL}{1 - RL}$$

Equação 3

Onde:

ET' - eficiência total reduzida, adimensional;

ET - eficiência total; e

RL - razão de líquido.

2.1.3.4 Diâmetro de corte (d50)

O diâmetro de corte é o diâmetro da partícula que representa o poder de separação do hidrociclone. Quanto menor o diâmetro de corte, mais bem projetado foi o hidrociclone. O diâmetro de corte representa o diâmetro de uma partícula separada com eficiência granulométrica de 50%. Sendo assim, partículas maiores que o diâmetro de corte terão maiores possibilidades de serem separadas com eficiência superior a 50%, enquanto que as menores provavelmente serão separadas com eficiências abaixo desse patamar (VIEIRA, 2006).

Para se estudar o desempenho de um hidrociclone, as análises granulométricas das correntes de alimentação e “underflow” devem ser efetuadas para que se obtenha o diâmetro de corte. Este parâmetro é fundamental para o estudo do processo de separação por expressar o poder classificatório do equipamento, sendo utilizado como critério de comparação na avaliação de desempenho entre hidrociclones. Com base na definição de eficiência granulométrica, sabendo-se que $d_{50} = d(G = 0,50)$, o diâmetro de corte (d50) é obtido a partir da resolução numérica da Equação 4 (VIEIRA, 2006).

$$ET \frac{dX_u (d_{50})}{dX_a (d_{50})} = 0,50$$

Equação 4

Onde:

$$\frac{dX_u}{dX_a}$$

- razão da derivada da distribuição granulométrica na corrente do “underflow” e a distribuição granulométrica na corrente de alimentação.

2.1.3.5 Diâmetro de corte reduzido (d'_{50})

O diâmetro da partícula para o qual a eficiência granulométrica reduzida (G') é de 50% é conhecido como diâmetro de corte reduzido e pode ser obtido a partir da resolução numérica da Equação 5.

$$\frac{ET' \frac{dX_u(d'_{50})}{dX_a(d'_{50})} - RL}{1 - RL} = 0,50$$

Equação 5

2.1.3.6 Grupos adimensionais

A descrição matemática da operação de escoamento em um hidrociclone é bastante complexa, uma vez que ocorre escoamento eminentemente tridimensional (radial, axial e tangencial). Esse fenômeno seria teoricamente bem descrito pelas equações da continuidade e do movimento.

Desta forma, do ponto de vista matemático, a resolução dessas equações seria complexa e ainda desconhecida. Sendo assim, grande parte dos estudos com hidrociclone tem-se fundamentado nos grupos adimensionais relevantes desse fenômeno para o caso de suspensões, cujo líquido é um fluido newtoniano SVAROVSKY citado por CRUZ (2008). Os grupos adimensionais mais importantes no estudo com hidrociclones são os números de STOKES (Stk_{50}), EULER (Eu) e REYNOLDS (Rey), que estão respectivamente relacionados com o poder de classificação, com os custos energéticos e com o tipo de escoamento, cujas expressões são descritas pelas Equações 6, 7 e 8.

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

Equação 6

$$Eu = \frac{\Delta P^2}{\rho Vc^2}$$

Equação 7

$$Rey = \frac{\rho Dc Vc}{\mu}$$

Equação 8

Onde:

Stk₅₀ - número de Stokes, adimensional;

Eu - número de Euler, adimensional;

Rey - número de Reynolds, adimensional;

ρ_s - densidade do sólido, kg m⁻³;ρ - densidade da suspensão, kg m⁻³;Vc - velocidade da suspensão, baseada na seção cilíndrica do hidrociclone, m s⁻¹;d'₅₀ - diâmetro de corte reduzido, m;μ - viscosidade dinâmica do líquido, kg m⁻¹ s⁻¹;

Dc - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, m;

ΔP - diferencial de pressão entre as correntes de alimentação e do "overflow", Pa.

As equações 06, 07 e 08 usam a velocidade da suspensão no corpo do cilindro do hidrociclone como a velocidade baseada no diâmetro da parte cilíndrica, sendo calculada pela Equação 9.

$$Vc = \frac{4 Q_a}{\pi(Dc)^2}$$

Equação 9

Onde:

Vc - velocidade da suspensão, baseada na seção cilíndrica do hidrociclone, m s⁻¹;Q_a - vazão de alimentação, m³ s⁻¹; e

Dc - diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone, m;

2.1.3.7 Perda de carga

O líquido ao escoar através de um duto ou acessório sofre certa resistência ao seu movimento, em razão do efeito combinado da viscosidade e inércia. Essa resistência é vencida pelo líquido em movimento, mediante uma dissipação de parte de sua energia disponível ao que, comumente, se chama de perda de energia, especificamente “perda de carga”. Embora essa “perda” de energia seja comumente designada como “perda por fricção” ou “por atrito”, não se deve supor que ela ocorra pelo efeito simples do atrito do fluido com as paredes dos dutos e acessórios. Junto às paredes desses componentes pode haver movimento do fluido e a velocidade se eleva de zero até o seu valor máximo, junto ao eixo dos mesmos. Pode-se assim imaginar uma série de camadas em movimento, com velocidades diferentes e responsáveis pela dissipação dessa energia (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

DANIEL BERNOULLI, citado por CRUZ (2008), estabeleceu em 1738 que, a soma das energias piezométricas, cinéticas e geométricas que ocorrem ao longo de qualquer linha de corrente é constante. O teorema de “BERNOULLI” traduz em termos analíticos o princípio de conservação de energia. Quando aplicado à condução de um líquido real, o balanço dessas energias pode ser representado pela Equação 10, denominada equação de “BERNOULLI”, aplicada a duas seções quaisquer de um líquido real em movimento.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_f$$

Equação 10

Onde:

$\frac{P_1}{\gamma}$ e $\frac{P_2}{\gamma}$ - cargas piezométricas, m;

$\frac{V_1^2}{2g}$ e $\frac{V_2^2}{2g}$ - cargas cinéticas, m;

Z_1 e Z_2 - cargas geométricas, m; e

H_f - perda de carga, m.

2.1.3.8 Perda de carga em hidrociclones

Qualquer causa perturbadora que venha estabelecer ou elevar a turbulência em um meio líquido é responsável por uma perda de carga. Este fenômeno decorre da conversão e dissipação de parte da energia mecânica em calor, provocada pela inércia e turbilhonamento, sendo denominadas de perdas localizadas. Apesar dessas perdas ocorrerem em locais isolados ao longo do sistema, as mesmas podem se estender à jusante e a montante desses locais (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998).

Segundo LACERDA (2007), o conhecimento da perda de carga em hidrociclones é importante, sendo necessário para estabelecer o consumo de energia do equipamento em operação. A queda de pressão diminui quando a suspensão passa pelo equipamento. Essa queda de pressão consiste das perdas atribuídas na entrada, saída e dentro do hidrociclone, devido à dissipação da energia em função do fluxo rotacional turbulento.

2.1.4 Modelagem da partição de ciclones

Nos anos sessenta, principio-se a aplicação de modelos matemáticos para as operações de tratamento de minérios. As operações de classificação receberam, desde o início, atenção especial. Isto porque a previsão das distribuições

de tamanhos é uma ferramenta de extrema utilidade para o controle de processo, especialmente para os circuitos com controle automático tipo “feed-forward”. Vários modelos teóricos foram apresentados, todos eles extremamente limitados. O esforço em substituir os modelos empíricos continua (CHAVES, 2007).

2.1.4.1 Modelo de Lynch e Rao

O tratamento de Lynch e Rao incluiu na curva de partição de Yoshioka o conceito de curto-circuitagem, esta não passa pela origem. Conforme descrito por Kelsall, as partículas curto-circuitadas são partículas deslocadas pelo escoamento da água que se dirige para o underflow. A partição entre underflow e overflow será a mesma da água, as partículas em suspensão na água não reagem à classificação, acompanhando assim, a água na qual estão em suspensão. Então Lynch e Rao perceberam que é possível corrigir na curva de partição real a deformação devida à curto-circuitagem das partículas finas, atribuindo como fator de correção a partição da água. Como se observa na Figura 6 a curva de partição volta a passar pela origem depois da correção, se colocada com abscissas d/d_{50} , é invariante com as condições de operação e dimensões do ciclone. Resulta a curva padrão de partição corrigida (CHAVES, 2007).

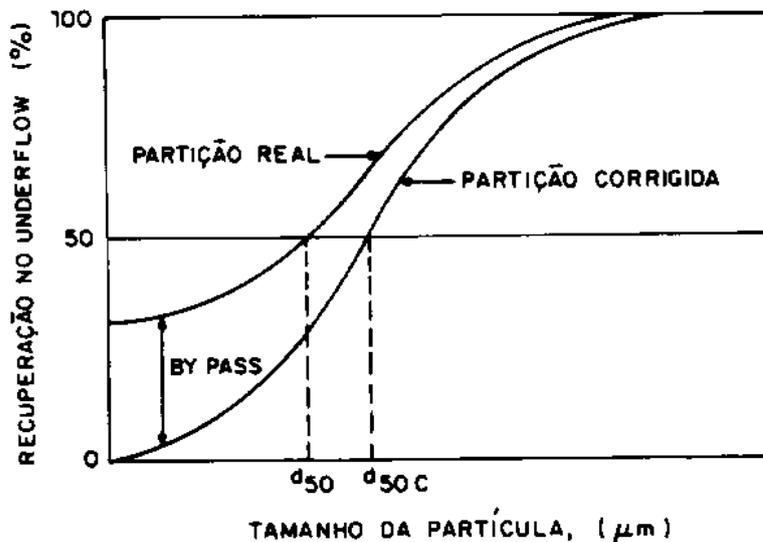


Figura 6 - Curvas de partição típicas de hidrociclone.

Fonte: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA S. L. M (2004).

O modelo de Lynch e Rao também serve para prever o comportamento das partículas da alimentação dentro de um ciclone classificador, porém não se limita a isso, pois correlaciona as variáveis de projeto e de operação à separação obtida ou esperada. Fornecendo uma compreensão muito clara e completa do funcionamento do ciclone em termos de separação de partículas. Este modelo baseia-se numa série de equações que descrevem a relação entre a vazão do ciclone e a pressão da alimentação, curva padrão de partição, vazão de água, d_{50} – diâmetro mediano de partição, corrigido. Os diâmetros do vortex finder, do apex e da entrada de alimentação são definidas como variáveis de projeto e a vazão, porcentagem de sólidos na alimentação e distribuição granulométrica da alimentação são definidas como variáveis de operação.

2.1.4.1.1 Curva de partição

Neste modelo é considerado o fluxo de partículas sólidas descarregadas no underflow de um ciclone como constituído de dois fluxos independentes, o fluxo das partículas, que sofreram classificação e o fluxo das partículas, de todos os tamanhos, que foram curto-circuitadas, isto é, que não sofreram classificação. Diante disto, é admitido de este ultimo fluxo é proporcional, para cada classe granulométrica, á partição de água, é possível corrigir a curva de partição obtida em experimentos industriais ou de laboratório, utilizando a Equação 11.

$$\text{Partição corrigida} = \frac{\text{partição} - R_f}{100 - R_f} \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

R_f – é partição da água, porcentagem da água alimentada que vai para o underflow.

A curva de partição assim corrigida, apresentada em função de d/d_{50} é a “curva padrão de partição corrigida”. Esta sim é que é invariante, pois, conforme Lynch e Rao, ela independe do diâmetro do ciclone, dos diâmetros de saída e das condições operacionais; a curva padrão de partição corrigida, determinada para um

dado minério num ciclone pequeno pode ser usada para scale-up e projetos de instalações industriais, podendo ser definida pela Equação 12.

$$y = \frac{e^{\alpha \frac{d}{d_{50}}} - 1}{e^{\alpha \frac{d}{d_{50}}} + e^{\alpha} - 2} \quad \text{Equação 12}$$

α é uma variável que descreve a forma da curva, o valor mais comum é 4. Valores inferiores indicariam uma distribuição da “eficiência de classificação”. É indicado para ciclones em um estagio, $\alpha = 3$ a 4, para ciclones com lavagem, α passa para 5 ou 6 e que em circuitos fechados de moagem, α fica em torno de 2,5. Portanto, a Equação 12 descreve a separação das partículas efetivamente classificadas. Para adicionar a estas as partículas curto-circuitadas, basta adicionar de cada classe granulométrica uma fração igual à partição de água.

2.1.4.1.2 d_{50} corrigido

$$\log d_{50c} = 0,0173 \text{ FPS} - 0,0695 \text{ spig} + 0,0130 \text{ VF} + 0,000048 \text{ Q} + k \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

FPS - % sólido em peso na alimentação;

spig – diâmetro do apex, cm;

VF – diâmetro do córtex finder, cm;

Q – vazão de polpa, 1/min;

k – constante

Os autores mencionam que d_{50} é diretamente proporcional à pressão de alimentação, mas a equação não explicita isso. Mencionam também ser diretamente proporcional ao diâmetro do vortex finder, inversamente proporcional à vazão de água no overflow. A equação 13 tem uso restrito e não serve para scale-up. Os autores apresentam outras equações de forma semelhante para aplicação em

condições específicas. A “receita” do profº Lynch para o scale-up usando a sua equação é:

- a. executar os ensaios usando ciclones pequenos e minério de distribuição granulométrica bem próxima da esperada para a aplicação que se tem em vista. Obter uma serie de valores de d50.
- b. Em seguida, assegurar-se de que, durante os ensaios, o UF esteja escoando livremente através do apéx – descarga tipo spray – que caracteriza o regime de classificação.
- c. Derivar uma equação da forma acima. Ela será adequada para o scale-up do caso específico em estudo, se forem mantidas as relações aproximadas entre VF, orifício de alimentação, apex e diâmetro do ciclone.

2.1.4.1.3 Relação pressão-vazão

De acordo com Lynch e Rao, essas variáveis são correlacionadas pela seguinte equação:

$$Q = k \cdot VF \cdot \sqrt{P} \cdot (FPW)^{0,125} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

P – pressão da alimentação (kPA);

FPW - % de água na alimentação, em peso;

K – é constante para dada instalação. Variando o orifício de alimentação, ela já não vale mais. Esta equação mostra que o diâmetro do apex tem efeito desprezível sobre a vazão; a vazão é diretamente proporcional ao diâmetro do vortex finder; a vazão é diretamente proporcional à raiz quadrada da pressão de alimentação.

Quando a distribuição granulométrica da alimentação é mantida constante, os autores recomendam usar a Equação 15:

$$Q = k \cdot (VF)^{0,73} \cdot (Inlet)^{0,86} \cdot P^{0,42} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

Inlet – diâmetro de entrada (cm).

2.1.4.1.4 Partição de água

Tem uma relação linear entre a água que entra com a alimentação e a que sai pelo overflow. A variável de controle é o diâmetro do apex:

$$WOF = 1,07 \cdot WF - 3,94 \cdot (Spig) + K \quad \text{Equação 16}$$

WOF – vazão de água no overflow (t/h);

WF – vazão de água na alimentação (t/h);

Spig – diâmetro do apex 9cm);

K – constante para uma dada instalação. Mudando a distribuição granulométrica da alimentação, muda o K.

O WOF não é o parâmetro de interesse, mas a partição de água $R_f = (WF - WOF)/WF$, que permitirá calcular o by-pass.

2.1.4.2 Modelo de Plitt

Este modelo foi desenvolvido em 1976 a partir da análise estatística de, aproximadamente, trezentos ensaios experimentais. As premissas básicas de Plitt são as mesmas de Lynch e Rao.

Para aplicar o modelo são necessários:

a. descrição completa do fluxo de alimentação:

- distribuição granulométrica da alimentação;
- vazões mássicas de sólidos e de polpa;
- vazão volumétrica dos sólidos;

- vazão de água;
- porcentagens de sólidos em massa e em volume,
- densidades dos sólidos e da polpa.

b. Dimensões do ciclone – diâmetro do ciclone, dos orifícios e comprimento do vortex finder.

2.1.4.2.1 Curva de partição

Os fatores que determinam os fluxos do overflow e do underflow são as características do fluxo de alimentação, dimensões do ciclone, característica de mineral, condições de operação. A partição é definida por uma função de Rosin-Rammler:

$$Y_i = 1 - e^{[-0,693(di/d_{50})^m]} \quad \text{Equação 17}$$

O parâmetro m fornece uma indicação da “eficiência da separação”. Para $m > 3$ a eficiência é alta. Separações de baixa eficiência têm $m < 2$. m depende das variáveis operacionais segundo:

$$m = 1,08 \cdot e^{0,58 - 1,58(Q_u/Q)} \cdot (D_c^2 \cdot h/Q)^{0,15} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

Q_u – vazão do underflow (1/min), função do diâmetro do apex;

Q – vazão da alimentação (1/min);

D_c – diâmetro do ciclone (cm);

h – altura da extremidade do vortex finder, em relação ao topo do apex (cm).

2.1.4.2.2 Vazão

A vazão é dada por:

$$Q = 0,7 \cdot Dc^{0,21} \cdot (Do^2 + Du^2)^{0,49} \cdot h^{0,16} \cdot e^{-0,00555\phi} \cdot P^{0,56} \quad \text{Equação 19}$$

Onde ϕ é a fração de sólidos em volume e as dimensões dos orifícios são dadas em cm.

A pressão é:

$$P = 1,88 \cdot \frac{QP^{1,78} \cdot e^{0,55\phi}}{Dc^{0,27} \cdot Di^{0,94} \cdot (Du^2 - Do^2)^{0,87} \cdot h^{0,28}} \quad \text{Equação 20}$$

E a carga estática da polpa:

$$H = P/9,80313 \cdot R_p \quad \text{Equação 21}$$

Onde R_p é a densidade da polpa em g/cm³.

O diâmetro mediano de partição é dado pela Equação 22:

$$d_{50} = \frac{39,7 \cdot Dc^{0,46} \cdot Di^{0,6} \cdot Do^{1,21} \cdot e^{6,3\phi}}{Du^{0,71} \cdot h^{0,38} \cdot Q^{0,45} \cdot (\rho_s - \rho_1)^{0,5}} \quad \text{Equação 22}$$

Onde ρ_s e ρ_1 são as densidades dos sólidos e da água em g/ cm³.

2.1.4.2.3 Calculo do by pass

O É feito através das seguintes equações:

$$\text{partição volumétrica} = \frac{\text{vazão UF}}{\text{vazão OF}} = 1,9 \cdot \frac{(Du/Do)^{3,31} \cdot h^{0,54} \cdot (Du^2 - Do^2) \cdot e^{0,54\phi}}{H^{0,24} \cdot Dc^{1,11}} \quad \text{Equação 23}$$

$$\text{by pass} = B = \frac{\frac{S}{1+S} - Rs \cdot Sv}{1 - Sv} \quad \text{Equação 24}$$

Rs não é explícito nesta equação – deve ser calculado por tentativas.

Plitt fornece a equação definida pela função de Rosin e Rammler para representar a partição no ciclone. Variando o expoente m, varia a forma da curva e portanto, os resultados previstos para a classificação. m, por sua vez depende da geometria do ciclone. Aqui reside portanto a diferença fundamental entre os modelos de Lynch e Rao e de Plitt. Enquanto o primeiro modelo afirma que a partição é invariante, para Plitt ela depende da geometria do ciclone.

Na Figura 7, é mostrado a influência do aumento de (α) na curva de partição reduzida. Os dois modelos arbitrariamente utilizam leis matemáticas para representar a curva de partição. Em alguns casos isto pode levar a desvios consideráveis da realidade experimental. O modelo de Lynch –Rao, por ter o parâmetro α acertável de acordo com as condições especificadas do circuito em que se está trabalhando, permite um ajuste melhor às condições experimentais que o modelo de plitt (LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA S. L. M, 2004).

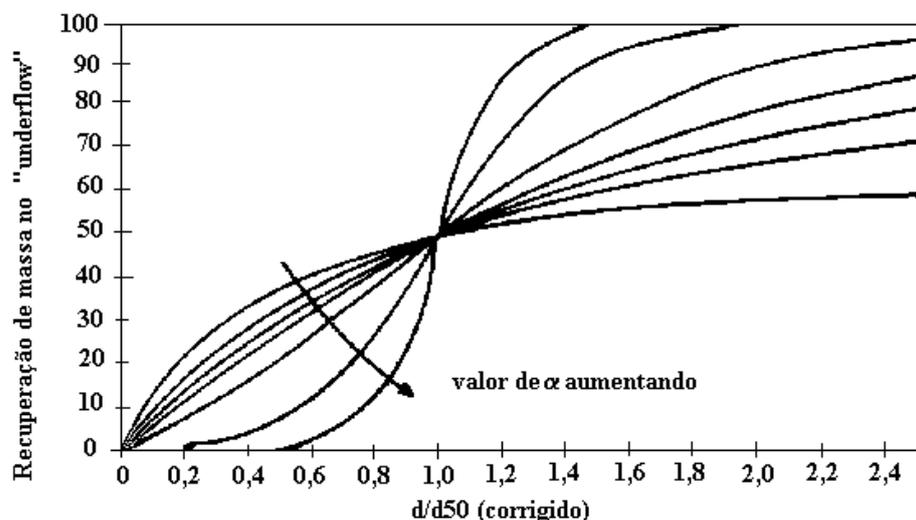


Figura 7 - Influência do aumento de α na curva padrão de partição.
Fonte: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA S. L. M (2004).

2.1.5 Influencia dos parâmetros na classificação por hidrociclone

Os hidrociclones utilizados em escala piloto permitem modificações de alguns parâmetros, como diâmetro e comprimento do *vortex finder*, diâmetro do hidrociclone, área do injetor, diâmetro do *apex*, ângulo de cone, comprimento da parte cilíndrica, (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007). Atualmente, alguns fabricantes de hidrociclones têm voltado os seus estudos para a forma de alimentação e tem feito algumas modificações neste parâmetro.

- **Diâmetro e Altura do Vortex Finder:** a variação de seu diâmetro torna possível regular a capacidade e o diâmetro de corte. A altura tem que ser suficiente para ultrapassar o ponto inferior da abertura de entrada.
- **Diâmetro do Hidrociclone:** as dimensões do hidrociclone são determinadas pelo diâmetro de corte. Este parâmetro tem grande influência sobre o diâmetro de corte da classificação, e capacidade do equipamento é determinado pelo diâmetro interno da seção cilíndrica.
- **Diâmetro do Apex:** o aumento do diâmetro do apex diminui o diâmetro de classificação. Porém o inverso é mais limitado, porque as partículas maiores só podem ser descarregadas pelo apex.
- **Ângulo do Cone e o Comprimento da parte Cilíndrica:** estes parâmetros afetam o tempo de residência da polpa no hidrociclone. Quando um hidrociclone com a parte cilíndrica de diâmetro fixo, diminuindo o ângulo da seção cônica aumentará o comprimento da seção cilíndrica, introduzindo um aumento do tempo de residência, sendo assim a classificação também será mais fina.

Um parâmetro que a cada dia vem ganhando o seu espaço nos novos projetos é a forma de alimentação. Isto é ocasionado pela tentativa de se obter uma

separação mais fina a partir de altas concentrações de sólidos na alimentação. Porém isto está associado com um alto desgaste do hidrociclone e bomba.

Atualmente, varias empresas estão revendo os seus projetos de hidrociclone e fazendo modificações na forma de alimentação, pois perceberam que a alimentação tangencial (tradicional) não é tão eficaz, introduziram assim a alimentação em involuto ou centro tangencial, “rampas”, única laminar geometria de entrada em espiral. Todas estas modificações foram feitas para obter melhor eficiência na classificação e reduzir o desgaste dos equipamentos.

3. METODOLOGIA

Primeiramente, durante a realização desse estudo, foi realizado uma revisão de literatura sobre as principais aspetos teóricos de hidrociclonagem.

Posteriormente, buscou-se ter acesso as informações sobre os setores que o equipamento de hidrociclone está sendo empregado nas indústrias, visando ter um maior conhecimento sobre os seus usos e aplicações.

Por fim levantar as vantagens que o uso do equipamento hidrociclone propiciou, nos diversos campos industriais.

4. USOS E APLICAÇÕES DOS HIDROCICLONES

Os hidrociclones são amplamente utilizados no setor industrial, tais como, têxtil, alimentício, químico, petroquímico, metalúrgico, siderúrgico, tratamento de água, ambiental, concentração de partículas e também são empregados nas operações unitárias de separação de sólido-líquido (OLIVEIRA *et al*, 2008).

4.1 MINERAÇÃO

Na mineração os hidrociclones apresentam uma vasta utilização em variadas operações. Segundo TRAWINSKI citado por LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA (2004), as principais aplicações são na classificação, espessamento, deslamagem, pré-concentração e também na barragem de rejeitos.

4.1.1 Classificação

Geralmente utilizado no fechamento de circuito de moagem onde o *underflow* do hidrociclone retorna ao moinho. Com a configuração de hidrociclones em série, é provável ter-se um conjunto de produtos com granulometria definida, sendo usado em uma classificação mais seletiva.

Vem sendo observa da nos processos de muitas plantas de beneficiamento mineral é a tentativa de se obter uma separação mais fina a partir de altas concentrações de sólidos na alimentação. Para alcança este objetivo de separações finas em altas concentrações de sólidos na alimentação com maior eficiência de classificação, em plantas de mineração esta sendo utilizado hidrociclones. Esta separação torna-se possível por causa da combinação correta da

seção cilíndrica, ângulos dos cones e desenho do *ápex* aliada à otimização da câmara de alimentação, reduzindo, a turbulência ao mínimo e maximizando a velocidade tangencial nas diferentes zonas de separação do hidrociclone. Por tanto maximizando a eficiência na classificação. Figura 8.



Figura 8 – Bateria de hidrociclone da Mina do Sossego.

4.1.2 Espessamento

O termo espessamento refere-se à eliminação de maior quantidade de água para produzir uma drenagem dos sólidos. O objetivo do espessador é recuperar todos os sólidos.

Os hidrociclones são usados em substituição aos espessadores gravitacionais, embora produzindo *underflow* com concentrações mais baixas, elimina uma grande parte da água de uma polpa.

4.1.3 Deslamagem

Nesta operação o objetivo é remover as partículas finas em conjunto com maior fluxo. Isso é muitas vezes necessário para melhorar produto para os processos subseqüentes, tais como flotação, separação molhado magnética, filtração, etc. Em fábricas de produtos químicos, a deslamagem por hidrociclones são freqüentemente usados para eliminar água, após um processo de cristalização, os cristais finos, são evacuados para o aumento de fluxo, sendo reciclados ao cristalizador onde atuam como núcleos para a formação de um novo cristal.

Este método é geralmente necessário para a utilização dos processos de separação magnética a úmido, filtração e entre outros.

4.1.4 Pré-Concentração

O hidrociclone usado para concentração gravítica é projetado para minimizar o efeito de classificação e maximizar a influência da densidade das partículas. O hidrociclone é alimentado tangencialmente, sob pressão, gerando um *vortex* em torno do eixo longitudinal. Inversamente proporcional ao raio, a força centrífuga é muito grande perto do *vortex* e causa a estratificação radial das partículas de diferentes densidades e tamanhos por aceleração diferencial.

As partículas pesadas, que estão mais sujeitas a uma ação da força centrífuga, movimentam-se para a parte superior da parede do cone, com a formação de leito por sedimentação retardada, no qual as partículas leves e grossas situam-se mais para o centro do cone e as finas, por consolidação intersticial, preenchem os espaços entre os minerais pesados e grossos.

Primeiramente as partículas leves, em seguida as mistas ou de densidade intermediária são arrastadas para o *overflow* pelo fluxo aquoso ascendente,

enquanto o leito estratificado se aproxima do *ápex* Figura 9. Próximo ao *ápex* as partículas finas e grossas são carregadas para o *overflow* pela corrente ascendente e as pesadas, finas e grossas são descarregadas no *ápex* (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004).

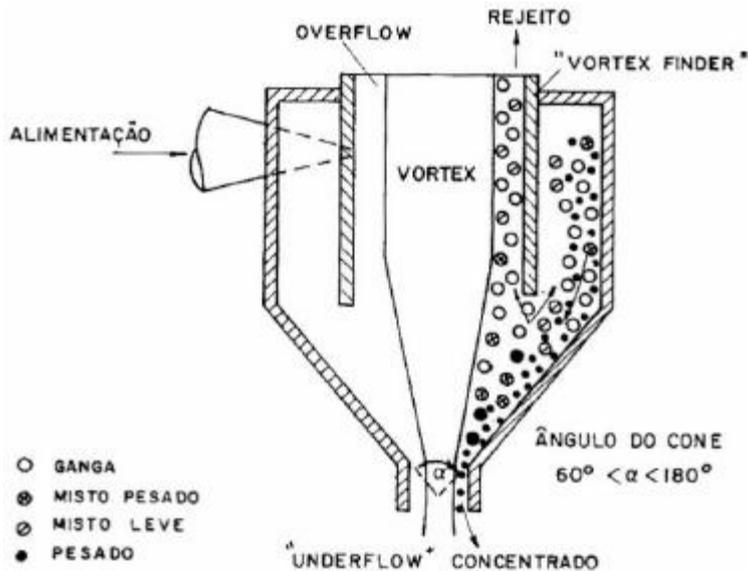


Figura 9 – Hidrociclone concentrador.
 Fonte: LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA (2004)

Os hidrociclones são chamados na língua inglesa de *short-cone*, *wide-angle cyclone*, *water-only cyclone* e *hydrocyclone*. Todos eles se assemelham quanto aos princípios de separação descritos anteriormente. Estão esquematizados na Figura 10.

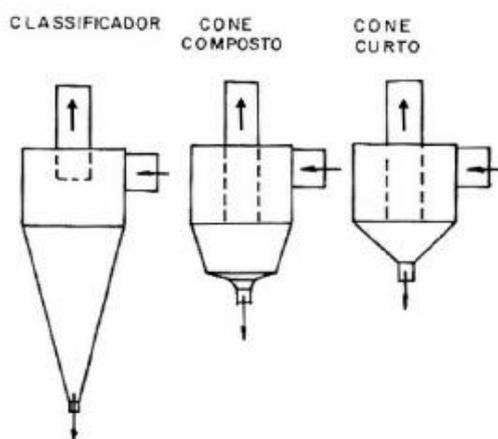


Figura 10 – Esquema de um ciclone classificador e dois tipos de ciclone concentradores
 Fonte: LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA (2004)

Os ciclones *water-only cyclone*, também chamado de ciclone autógeno, e do tipo tricône são usualmente indicados para a pré concentração de finos de carvão abaixo de 0.6 mm, onde a fração leve resultante é em seguida tratada por flotação. Este tipo de circuito é muito usado nos casos de dessulfuração de carvões em que o enxofre está associado à pirita.

A aplicação do hidrociclone foi estudada com minérios auríferos da África do Sul, como alternativa aos ciclones classificadores, objetivando enriquecer a alimentação para o circuito gravítico e diminuir a massa de material a ser concentrada, ao mesmo tempo em que reduz o teor de ouro do *overflow* a ser cianetado. Em um único estágio foi alcançada uma razão de concentração de até 5, com recuperação de ouro de 62%.

4.1.5 Barragem de rejeito

Os hidrociclones, quando utilizados na planta de beneficiamento, têm a função de separar, classificar, concentrar, reaproveitar parte do minério antes deste ser descartado, de forma que essa parcela possa ser reprocessada durante o beneficiamento. Quando instalados próximos à barragem Figura 11, os hidrociclones têm como objetivo separar o material de granulometrias diferentes, conhecidas como *underflow* (rejeito granular) e *overflow* (lamas).

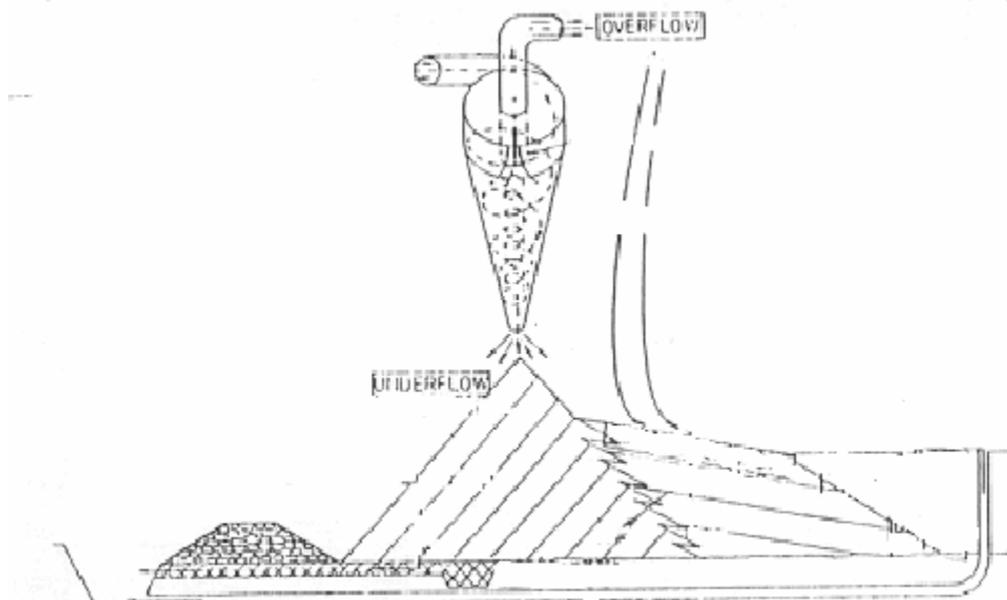


Figura 11 - Modelo de utilização da hidrociclonação
 Fonte: ARAUJO (2006)

O material que sai do hidrociclone pela parte superior (*overflow*) fica com água incorporada e apresenta granulometria fina compondo a lama, e o material que sai pela parte inferior (*underflow*) compõe o rejeito granular, assim o material mais grosso apresenta melhores características de resistência e permeabilidade se comparado ao *overflow*. Em uma mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais o rejeito granular (*underflow*) é utilizado como material de construção da estrutura da barragem enquanto a lama é lançada diretamente no reservatório. A utilização do rejeito granular como material de construção causa um aumento na estabilidade da estrutura pela manutenção do alto coeficiente de permeabilidade do maciço, evitando que o material fino se incorpore ao aterro de construção.

4.2 INDÚSTRIA PETROLÍFERA

A maior parte do petróleo produzido no Brasil é extraída de campos marítimos, onde os sistemas de produção em alto mar (*offshore*) são os responsáveis por seu tratamento primário. O preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado, a busca por separadores compactos e

eficientes tem sido uma constante e os hidrociclones se enquadram nessa classe de equipamentos.

Esse tratamento se faz necessário devido à mistura extraída constituir-se, de fases, geralmente, de uma fração oleosa, outra aquosa e uma quantidade de gás, associada ou não a fase oleosa.

Durante a vida produtiva de um campo petrolífero ocorre, geralmente, a produção simultânea de gás, óleo e água, juntamente com impurezas. Como o interesse econômico é somente na produção de hidrocarbonetos, é necessário dotar as unidades de produção de equipamentos para o processamento primário dos fluidos.

A produção de um poço de petróleo se modifica continuamente com o passar do tempo. Numa fase inicial, quando o poço é novo, o produto extraído apresenta uma reduzida quantidade de água misturada ao petróleo. Entretanto, na medida em que esse poço envelhece as quantidades de água misturadas ao produto são crescentes.

No sentido de que o petróleo e o gás apresentam relevante interesse econômico para a indústria, a água se caracteriza como um dos contaminantes mais indesejados em processos de petróleo e gás. Ao mesmo tempo, a concentração de óleo na água deve ser mínima para o descarte regular da fase aquosa ao mar.

É nesse contexto que a aplicação do hidrociclone Figura 12 está inserida, o mesmo vem sendo utilizado no tratamento da fase aquosa para descarte no mar, sua inserção na indústria do petróleo ocorreu quando, em princípios da década de 70, o governo britânico, preocupado com os danos ecológicos e econômicos que derramamentos de óleo podiam produzir ao atingir as costas das ilhas britânicas, encomendou às universidades locais o desenvolvimento de um equipamento que permitisse a remoção de óleo da água contaminada e devolução desta ao mar com um resíduo mínimo.

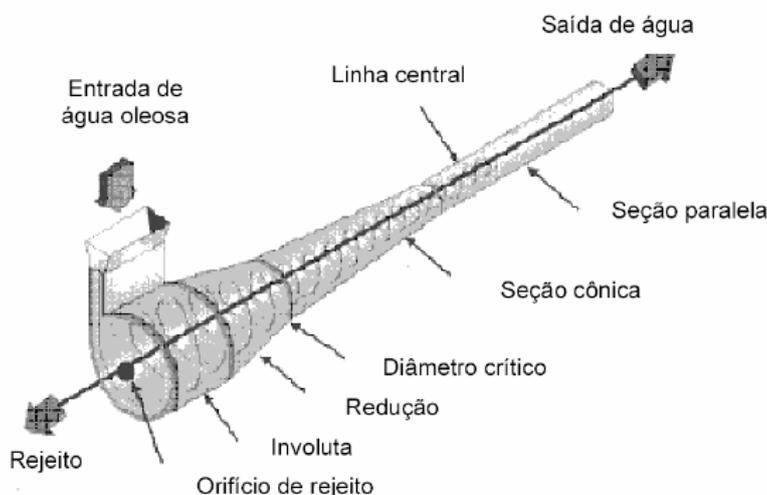


Figura 12 - Desenho esquemático de um hidrociclone

Fonte: RAPOSO (2008)

Neste princípio, o uso do hidrociclone tem como principal objetivo a obtenção de uma fase aquosa com concentração de óleo dentro dos limites requeridos por órgãos fiscalizadores para ser descartada no mar.

Anteriormente, esse processo era realizado por separadores gravitacionais, todavia com a utilização do hidrociclone houve diminuição do tempo de residência das fases ao se promover a separação. No caso dos hidrociclones a separação ocorre em segundos, acarretando ganhos evidentes quanto à questão da área ocupada e de peso acrescido à unidade de produção. Vantagem a qual é ainda mais importante no caso de unidades marítimas e flutuantes onde o custo do espaço é valorizado em relação a unidades terrestres.

Devido à demanda da indústria do petróleo por métodos mais eficientes e de baixo custo para a purificação do óleo produzido, a utilização dos hidrociclones com o objetivo de remover as partículas de água dispersa numa corrente de óleo tem sido objeto de intensa pesquisa.

Apesar de várias pesquisas com hidrociclones, são escassos os dados disponíveis desse equipamento para separação água/óleo. Isso por que os principais financiadores dessas pesquisas, em geral são ligados às empresas do

setor de petróleo e não permitem a ampla divulgação dos resultados (RAPOSO, 2008).

A PETROBRAS avaliou o desempenho de hidrociclones fabricados pela KVAERNER. Estes equipamentos foram desenvolvidos com o intuito de desafogar os campos de produção da STATOIL – companhia de petróleo estatal da Noruega – no Mar do Norte, que tinha uma previsão de aumento da produção de água que ultrapassaria a capacidade instalada para trabalhar com altos teores de óleo (MARINS, 2007).

4.3 AGRICULTURA

A agricultura, em geral, buscou grandes progressos ao longo das últimas décadas. Dentre esses o uso da agricultura irrigada, que está inserida de forma integrada aos diversos processos de produção, tem se tornado, nos últimos anos, uma das atividades econômicas mais importantes no Brasil (SOCCOL, 2003).

Segundo BERNARDO *et al.* (2005) citado por CRUZ (2008), durante muitos anos, a maior preocupação da agricultura irrigada no Brasil estava ligada à disponibilidade de água para a irrigação, ou seja, com a quantidade desse recurso. Com o advento de novas tecnologias e sistemas de irrigação, em especial os de irrigação localizada, a qualidade da água passou a ser, em muitas regiões do País, o fator limitante para a implantação de novos projetos de irrigação.

Para a irrigação, a deterioração da qualidade de água pode resultar em problemas, tais como: comprometimento ou aumento dos custos de operacionalização de sistemas de irrigação, inviabilização da adoção de culturas irrigadas em que o uso da água possa implicar em contaminação dos alimentos e risco à saúde humana e animal, além do risco de tornar o solo improdutivo.

Tem-se verificado uma grande concentração de sólidos grosseiros (areia) nas águas utilizadas para fins de irrigação, o que tem comprometido a eficiência dos

sistemas, principalmente, no que se refere à obstrução dos emissores, causando grandes concentrações de areia nas águas bombeadas para irrigação, comprometendo a qualidade para esse fim (SOCCOL *et al.*, 2005).

É nesse contexto que a aplicação do hidrociclone está inserida, o mesmo vem sendo utilizado como pré-filtro nos sistemas de irrigação para a remoção de partículas de areias, utilizando da sedimentação centrífuga como princípio de separação, em que as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca a remoção de partículas suspensas na água.

Como a quantidade e a qualidade da água são parâmetros importantes a serem considerados na irrigação, já que dependendo de suas características físicas, químicas e biológicas o seu uso pode se tornar limitado ou até inviabilizado, faz se necessário o uso de pré-filtros para minimizar o problema decorrente da presença de sólidos em suspensão na água de irrigação.

Assim o uso do hidrociclone como pré-filtros vem solucionando os problemas de obstrução física de tubulações e emissores, por sólidos suspensos e por sólidos solúveis, sobretudo em sistemas de irrigação localizada, em que os orifícios de passagem são de pequenos diâmetros.

Desta forma o uso do hidrociclone como pré-filtros na agricultura irrigada Figura 13, garante maior vida útil aos equipamentos de irrigação e melhor desempenho do sistema, constituindo-se, uma estratégia fundamental para a redução dos custos de manutenção e substituição de equipamentos.



Figura 13 - Hidrociclone construído pela Empresa GALLO Irrigação e Equipamentos Agrícolas.
Fonte: CRUZ (2008).

Na agricultura irrigada brasileira, tem-se verificado pouco conhecimento dos técnicos da área de irrigação sobre o potencial do hidrociclone como separador de sólido-líquido, aliado às pouquíssimas informações científicas relevantes ao estudo de desempenho do equipamento como pré-filtro em sistemas de irrigação, fazendo com que o hidrociclone seja utilizado com menos frequência que o são em sistemas de irrigação de países como Israel e Estados Unidos (CRUZ, 2008).

4.4 LIMPEZA

Os hidrociclones Figura 14 podem ser utilizados em limpeza de *coolant* e são operados em todos os lugares onde partículas extremamente sujas precisam ser separadas dos líquidos de baixa viscosidade.



Figura 14 – Bateria de hidrociclones
 Fonte: MANN+HUMMEL HYDROMATION NV

Neste tipo de aplicação o hidrociclone Figura 15 apresenta alto grau de limpeza, sendo apropriado para partículas magnéticas e não magnéticas e não deteriora o coolant, já que esse recebe ventilação constante o que lhe propicia uma vida útil maior.

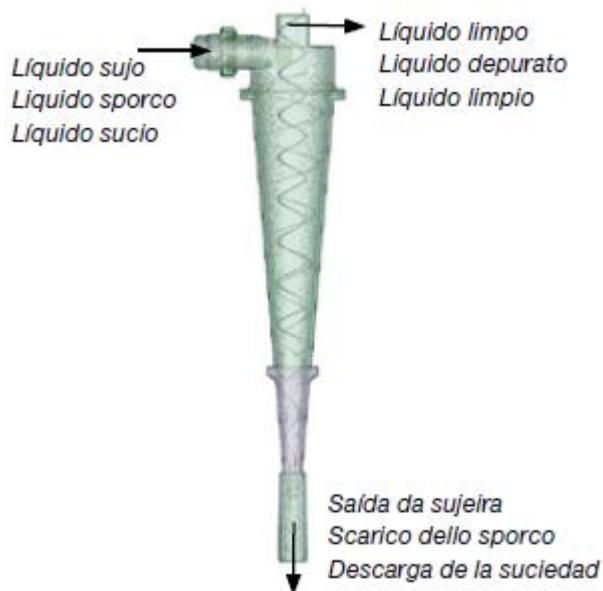


Figura 15 – hidrociclone
 Fonte: MANN+HUMMEL HYDROMATION NV

Oferece ainda uma garantia de operação através de princípio de funcionamento simples e a vantagem do menor custo de manutenção.

4.5 TEXTIL

Na indústria têxtil o hidrociclone é aplicado nos processos têxteis de tecnologia de remoção de fibras como meio filtrante. Essas tecnologias encontram-se integradas no setor de beneficiamento e acabamento da Indústria Têxtil. Neste setor destacam-se os processos de pré-alveamento, alveamento, processos de preparação ao tingimento e no próprio tingimento.

4.6 QUÍMICO

A separação de microorganismos vem ganhando destaque no mercado industrial. Exigindo assim das empresas ações que busquem aumentar a recuperação e o reaproveitamento de subprodutos industriais. Na atualidade são utilizadas centrífugas tubulares operando em série com elevadas rotações para atingir uma eficiência de separação desejada (70%). Outra técnica de separação destes microorganismos é através do uso de minihidrociclones (BORGES et al., 2005).

Na separação de leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, vem sendo utilizado hidrociclones individuais que estão apresentando eficiência total de grandeza em torno de 40%.

A utilização de hidrociclones torna-se uma alternativa atraente do ponto de vista econômico, pois este apresenta inúmeras vantagens em relação às centrífugas, como baixo custo de aquisição, instalação e manutenção.

4.7 TRATAMENTO DE ÁGUA

O transporte marítimo pode emitir alguns poluentes, como emissão de gases nocivos a saúde, derramamento de óleo e efluentes a bordo. Com a legislação ambiental mais rígida, segmento busca normalizar as condições dos navios.

Nestes transportes, há a contaminação por resíduos como águas gordurosas provenientes de cozinha, lavanderias, banheiros e drenos, conhecida como águas negras e águas cinza; por partículas derivadas da incineração de lixo emissão de CO e CO₂; o próprio lixo sólido, na maioria resíduos orgânicos e derivações da limpeza dos tanques. Além dos resíduos gerados do lixo, existe a poluição através dos Acionadores Principais: motores diesel, turbinas a gás, caldeiras, entre outros, e os Sistemas de Geração de Eletricidade: motores de combustão auxiliares e turbogeradores a gás (AQUAFLOT AMBIENTAL, 2008).

Vários métodos vêm sendo utilizados para separar o óleo da água das praças de máquinas em navios, um deles é a utilização de hidrociclones. O óleo por si só está em diversos pontos dos transportes marítimos, inclusive se houver vazamentos eventuais, derramamento de óleo, manobra errada das válvulas ou falha no processo de recebimento e transferência do óleo.

4.8 PURIFICAÇÃO

O hidrociclone também pode ser utilizado em cozinhas industriais, como sistema de exaustão de cozinhas profissionais, como exemplo, a utilização do hidrociclone/scrubber na cozinha do restaurante da MC DONALD'S da cidade de Mestre. Com objetivo de verificar o abatimento de Hidrocarbonetos Poli-nucleares Aromáticos (PAH), com grande preocupação com o que diz respeito ao risco da saúde pública, provenientes de tratamentos térmicos de alimentos em cozinhas industriais, mediante uma nova tecnologia de depuração.

4.9 RECUPERAÇÃO DE AREIAS

O hidrociclone é utilizado na extração da areia, na remoção de areia, recuperação de areias finas, através do controle de tamanho de grão Figura 16, 17 e 18.



Figura 16 – hidrociclone utilizado na recuperação de areias
Fonte: metaltamega.lvengine.com/lmgs/content/page_50/HidroCICLONE_i1.JPG



Figura 17 – hidrociclone utilizado na lavra de areias
Fonte: BOUSO (1990)



Figura 18 – Hidrociclonação na recuperação de areias finas
Fonte: BOUSO (1990)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados a seguir, alguns fatores que, a partir da revisão teórica e da análise da metodologia apresentada no capítulo anterior foram elencados como vantagens do uso e aplicação dos hidrociclones, nas mais variadas áreas.

5.1 AS VANTAGENS DOS USOS E APLICAÇÕES DOS HIDROCICLONES

Com o estudo levantado neste trabalho, foi possível observar que o uso do equipamento hidrociclone apresentou diversas vantagens em muitas aplicações nos vastos campos industriais.

Dentre essas vantagens podemos citar a alta capacidade em relação ao seu volume e a área ocupada, baixo investimento, sendo também de fácil controle operacional e manutenção.

Com uso do hidrociclone na barragem de rejeito, pode-se utilizar o rejeito granular (*underflow*) como material de construção da estrutura da barragem, enquanto a parte do *overflow* “lama” é lançada diretamente no reservatório, podendo posteriormente retornar ao circuito de beneficiamento de minérios.

A separação feita por hidrociclone nas indústrias petrolífera ocorre em segundos, acarretando ganhos evidentes quanto à questão da área ocupada e de peso acrescido à unidade de produção. Vantagem a qual é ainda mais importante no caso de unidades marítimas e flutuantes onde o custo do espaço é valorizado em relação a unidades terrestres.

O uso do hidrociclone como pré-filtros na agricultura irrigada, garante maior vida útil aos equipamentos de irrigação e melhor desempenho do sistema,

constituindo-se, uma estratégia fundamental para a redução dos custos de manutenção e substituição de equipamentos

Na limpeza *coolant*, o hidrociclone apresenta um alto grau de limpeza, sendo apropriado para partículas magnéticas e não magnéticas e não deteriora o coolant, já que esse recebe ventilação constante o que lhe propicia uma vida útil maior.

Outra vantagem do hidrociclone é a sua versatilidade, pois ele, por exemplo, em transportes marítimos como um equipamento separador de água e óleo das praças de máquinas do navio, água gordurosa da cozinha, banheiro, lavanderia, bem como em eventuais vazamentos.

Os principais motivos da ampla utilização dos hidrociclones são a possibilidade de aplicações em condições severas de temperatura e pressão, a simplicidade de construção e manutenção e sua alta eficiência de coleta.

6. CONCLUSÃO

Conclui-se com esse trabalho que Hidrociclones são separadores centrífugos vastamente usados no setor industrial, tais como, têxtil, alimentício, químico, petroquímico, metalúrgico, siderúrgico, tratamento de água, ambiental, e são empregados nas intervenções unitárias de separação (por alteração de tamanho ou densidade) e/ou concentração de partículas. O hidrociclone é muito mais que um classificador de minerais. Pois ele pode ser utilizado em vários tipos de operações como separação sólido-líquido, líquido-líquido, espessamento, deslamagem, pré-concentração.

Constatou-se que os hidrociclones em alguns campos industriais precisaram passar por algumas modificações para ter uma maior eficiência, como foi na agricultura com a irrigação, onde o hidrociclone convencional ganhou um filtro, se tornando hábil na remoção de partículas sólidas, de maneira especial para água contendo suspensões de areia, podendo ser empregado como pré-filtro em sistemas de irrigação.

Observou-se também, a utilização do hidrociclone instalado próximo da barragem de rejeitos, objetivando assim, separar o material de granulometrias diferentes, na finalidade de reutilizar o *underflow* (rejeito granular), nos materiais de construção e *overflow* (lamas), ser despejado na barra, podendo mais tarde ser reutilizado na planta de beneficiamento.

Contudo em função de sua versatilidade, o hidrociclone tem amplas possibilidades de aplicações em condições severas de temperatura e pressão, Estando também a seu favor, a simplicidade de sua construção, operação e manutenção e sua alta eficiência de coleta.

Este trabalho foi apenas de cunho teórico, de modo abrangente, daí a necessidade de estudos mais aprofundados para se conhecer as varias aplicações do equipamento hidrociclone, buscando a melhora na eficiência de cada processo.

Este trabalho fica como base de informação para estudos posteriores. Onde, sugere-se um estudo sobre a aplicação do hidrociclone na barragem de rejeito. Obtendo assim, informações mais palpáveis sobre esta aplicação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, C. B. de. Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro [Rio de Janeiro] 2006.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDES, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. Manual de Hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BORGES, V. M.; Henrique, A; Alves, A. F.; Ataíde, C. H.; Ribeiro, E.J. Separação de leveduras em hidrociclones, *VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*. Universidade Federal Uberlândia, MG, 2005.

BOUSO, J. L. *Nuevos Tipos de Hidrociclones, EQUIPOS Y PROCESOS*, S.A. 1990

CHAVES, A. T. Teoria e prática do tratamento de minérios, Volume 1 – 3ª edição – São Paulo: Signus editora, 2006.

CRUZ, C. O. da. Desempenho de um hidrociclone de geometria “Rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação. (tese de doutorado) SÃO PAULO – BRASIL, 2008

INES, E.A.S.; CRUZ, O.C. Avaliação de um hidrociclone de geometria “Rietema” operando com diferentes razões de líquido, CEFET Uberaba – MG, FAPEMIG, [200-].

LACERDA, A. F. Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e infiltrantes. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA S. L. M. Tratamento de minérios. 4ª Ed. CETEM - MCT. Rio de Janeiro – 2004

MARINS, L. P. M. Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso [Rio de Janeiro] 2007

OLIVEIRA, *et al*, Estudo experimental da influência de cilindros porosos sobre o desempenho de hidrociclones, VIII Encontro Interno, XII Seminário de Iniciação Científica, UFU – 2008

RAPOSO, G. M. Simulação Numérica do Escoamento em Hidrociclone Destinado a Aplicações de Alto Teor de Óleo. (Dissertação de Mestrado) Rio de Janeiro, 2008.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. e BRAGA, P. F. A. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SILVA, M. A. P. Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

SILVA, M. A. P. and MEDRONHO, R. A. “Modelos que prevêm o desempenho de Hidrociclones: uma avaliação crítica”, XVI Encontro Nacional sobre Escoamentos em Meios Porosos, Petrópolis, 1988.

SILVÉRIO, B. C.; VIEIRA, L. G. M.; BARROZO M. A. DE S. Estudo da influência das variáveis geométricas no desempenho de hidrociclones, PROJETO Nº C-036/2005

SOCCOL, O.J. Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação. 2003. . Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SOCCOL, O. J.; BOTREL, T. A.; GERVÁSIO, E. S.; ULLMANN, M. N. Avaliação de um hidrociclone de Rietema para remoção de areia da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 2005.

SOUZA, F. J.; NETO, A. S. and BARROZO, M.A. “Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos em Hidrociclones com Modelagem Submata”, II Escola Brasileira de Primavera de transição e Turbulência – ETT 2000, Uberlândia-MG, 2000.

VALE, Manual da Usina da Mina do Sossego, 2007.

VIEIRA, L. G.M, Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, 2001.

VIEIRA, L. G. M.; BARROZO, M. A. S.; DAMASCENO, J. J. R . *Performance Analysis and Design of Filtering Hydrocyclone*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2005.

VIEIRA, L. G. M. Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia, MG, 2006.

AQUAFLOT AMBIENTAL. Tratamento de Água em Navios, 2008.
www.aquafлот.com.br

www.rochemt.com.br

MANH+HUMMEL HYDROMATION NV

www.mann-hummel.com

www.metaltamega.lvengine.com