



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

DIOGO HITOSHI YOKOYAMA

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE UM HIDROCICLONE
UTILIZANDO VISÃO COMPUTACIONAL

JOÃO PESSOA
2018

DIOGO HITOSHI YOKOYAMA

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE UM HIDROCICLONE
UTILIZANDO VISÃO COMPUTACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
título de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração: Eletrônica

Orientador:
José Maurício Ramos de Souza Neto

JOÃO PESSOA
2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

Y54s Yokoyama, Diogo Hitoshi.
Sistema de Monitoramento de um Hidrociclone Utilizando
Visão Computacional / Diogo Hitoshi Yokoyama. - João
Pessoa, 2018.
52 f. : il.

Orientação: Jose Mauricio Ramos de Souza Neto.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Hidrociclone. 2. Monitoramento dos Estados de
Operação. 3. Visão Computacional. I. Souza Neto, Jose
Mauricio Ramos de. II. Título.

UFPB/BC

DIOGO HITOSHI YOKOYAMA

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE UM HIDROCICLONE
UTILIZANDO VISÃO COMPUTACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
título de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração: Eletrônica

Aprovado em (15/06/2018)

Alexsandro José Virgínio dos Santos, D. Sc.

Universidade Federal da Paraíba
Avaliador, UFPB

Camila Seibel Gehrke, D. Sc.

Universidade Federal da Paraíba
Avaliador, UFPB

Prof. José Maurício Ramos de Souza Neto, D. Sc.

Universidade Federal da Paraíba
Orientador, UFPB

*Dedico este trabalho aos meus pais Marcos e Lucia,
com todo meu amor e gratidão por tudo que
fizeram por mim ao longo dessa jornada.*

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo amor e suporte que me deram ao longo de minha vida.

Aos meus amigos Fernando e Emanuel, pelas boas risada e momentos vividos ao longo de minha graduação.

Ao professor Alexsandro, por quem tenho grande estima e admiração, por todos os ensinamentos durante minha graduação.

Ao professor Maurício pela orientação durante este e muito outros trabalhos.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.”
Winston Churchill

Resumo

Hidrociclones são dispositivos amplamente utilizados em indústrias de minérios, químicas, petroquímicas e metalúrgicas, devido ao fato de apresentarem baixo custo de operação, versatilidade e uma simples construção. No entanto apesar da simplicidade desse equipamento, a modelagem dos fenômenos físicos que ocorrem no seu interior tem se mostrado bastante complexos resultando em um sistema difícil de ser controlado. Dessa forma diversos estudos tem sido desenvolvidos na tentativa de monitorar em tempo real o estado de operação do hidrociclone, esses métodos variam entre análise da concentração de sólidos em seu interior, tomografia e na medição da descarga na saída inferior do dispositivo.

Neste trabalho o desenvolvimento de um sistema para monitoramento de um hidrociclone baseado no perfil de saída inferior do dispositivo utilizando visão computacional é apresentado. A planta utilizada consiste de uma bomba hidráulica controlada através de um variador de tensão trifásico que regula a vazão na entrada do dispositivo e um hidrociclone em miniatura, feito utilizando a impressora 3D. O algoritmo para monitoramento foi implementado utilizando a biblioteca OpenCV, ensaios sob diversas condições e resultados são apresentados para validar o sistema desenvolvido.

Palavras-chave: Hidrociclone, Monitoramento dos Estados de Operação, Visão Computacional, Biblioteca OpenCV.

Abstract

Hydrocyclones are widely used in the mineral, chemical, petrochemical and metallurgical industries, due to their low operating costs, versatility and simple construction. However, despite its simplicity, the modeling of the physical phenomena that occur within it has shown to be quite complex resulting in a system difficult to be controlled. Thus, several studies have been developed in an attempt to monitor the hydrocyclone's operating status in real time, these methods vary between the analysis of the solids concentration in the interior, tomography and the measurement of the underflow of the device.

This work the development of a system for monitoring a hydrocyclone based on an output profile of the underflow is presented. The plant used consists of a hydraulic pump controlled through a three phase variac to regulate the flow at the entrance of the device and a miniature hydrocyclone was made using a 3D printer. The algorithm for monitoring was implemented using the OpenCV library, experiments were made under various conditions and the results are presented to validate the developed system.

Keywords: Hydrocyclone, Underflow Monitoring, Computer Vision, OpenCV Library.

Lista de Tabelas

1	Dados estatísticos do ensaio com peça de 30° fixo.	43
2	Dados estatísticos do ensaio com peça de 0° fixo.	44
3	Dados estatísticos do ensaio com hidrociclone em miniatura.	46
4	Dados estatísticos do ensaio com descarga em cordão.	47
5	Dados estatísticos do ensaio com a descarga em cone.	47
6	Dados estatísticos do ensaio com a descarga em transição.	49

Lista de Figuras

Figura 1:	Estrutura do hidrociclone.	18
Figura 2:	Forças agindo em uma partícula orbitando o hidrociclone.	19
Figura 3:	Estados de operação do hidrociclone.	20
Figura 4:	Simulação da variação do ângulo.	21
Figura 5:	Variação do ângulo em função da pressão na alimentação.	21
Figura 6:	Esquemático do detector mecânico.	23
Figura 7:	Arranjo dos eletrodos no hidrociclone.	24
Figura 8:	Adaptações para o método gravimétrico.	25
Figura 9:	Esquemático do sistema de monitoramento com <i>laser</i>	27
Figura 10:	Exemplo da extração da linha horizontal.	28
Figura 11:	Resultados da variação do ângulo em função do tempo ao aumentar a concentração.	28
Figura 12:	Exemplo de aplicação do filtro bilateral.	31
Figura 13:	Ilustração do método de Otsu.	32
Figura 14:	Afinamento das bordas do Canny.	33
Figura 15:	Limiar por histerese do Canny.	33
Figura 16:	Retas no plano xy e plano ab.	34
Figura 17:	Célula de acumulação.	34
Figura 18:	Exemplo do espaço parametrizado.	35
Figura 19:	Esquemático da planta.	36
Figura 20:	Peça impressas para realização dos testes.	37
Figura 21:	Câmera utilizada.	37
Figura 22:	Câmera utilizada.	38
Figura 23:	Fluxograma.	38
Figura 24:	Extração da região de interesse.	39
Figura 25:	Imagem em tons de cinza.	39
Figura 26:	Resultado da aplicação do filtro bilateral.	40
Figura 27:	Histograma da imagem após o filtro bilateral.	40
Figura 28:	Binarização da imagem.	41
Figura 29:	Resultado da detecção de bordas de Canny.	41
Figura 30:	Resultado transformada de hough.	41
Figura 31:	Descarga de 30°	42
Figura 32:	Resultados do ensaio com peça de 30°.	43
Figura 33:	Problema encontrado durante o ensaio.	43
Figura 34:	Descarga de 0°.	44
Figura 35:	Resultados do ensaio com descarga de 0°.	44
Figura 36:	Ensaio com hidrociclone em miniatura.	45

Figura 37:	Ensaio com hidrociclone em miniatura.	45
Figura 38:	Hidrociclone com descarga em cordão.	46
Figura 39:	Resultados obtidos com a descarga em cordão.	46
Figura 40:	Hidrociclone com a descarga em cone.	47
Figura 41:	Resultados obtidos com a descarga em cone.	47
Figura 42:	Hidrociclone com a descarga em transição.	48
Figura 43:	Resultados obtidos com a descarga em transição.	48
Figura 44:	Destaque para o instante em há um pico.	49

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivos Gerais	15
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	Hidrociclone	17
2.1	Estrutura e Funcionamento do Hidrociclone	17
2.2	Estados de Operação	19
3	Técnicas de Monitoramento	22
3.1	Detector Mecânico	22
3.2	Monitoramento por Tomografia	23
3.2.1	Tomografia por Raio-X	23
3.2.2	Tomografia por Impedância Elétrica	24
3.2.3	Tomografia por Resistência Elétrica	25
3.3	Método Gravimétrico	25
3.4	Monitoramento Acústico	26
3.5	Monitoramento por Sensor Capacitivo	26
3.6	Monitoramento por Análise de Imagens	26
4	Visão Computacional	29
4.1	Biblioteca OpenCV	29
4.2	Espaço de Cores	29
4.3	Filtro Bilateral	30
4.4	Binarização de Otsu	31
4.5	Detecção de Bordas de <i>Canny</i>	32
4.6	Transformada de <i>Hough</i>	33
5	Metodologia	36
5.1	Estrutura Mecânica	36
5.2	Materiais	36
5.3	Algoritmo	38
6	Resultados	42
6.1	Teste com Descarga de 30°	42
6.2	Teste com Descarga de 0°	43
6.3	Teste com Miniatura do Hidrociclone	44
6.4	Planta Piloto da UFOP	46

7 Conclusão

50

Referências Bibliográficas

51

1 Introdução

Em 1891 Eugene Bretney obteve o registro da primeira patente de um modelo de hidrociclone, inicialmente com a função de separar de areia da água em sistemas de água pressurizada (MACHADO, 1992). Durante o período de 1890 a 1939 um grande número de patentes foram registradas nos ciclones, no entanto os registros mostram que apenas poucas instalações comerciais foram feitas, os maiores avanços foram ocorrer apenas na década seguinte com pesquisas lideradas por M. G. Driessen da *Dutch State Mines* (DSM) na implementação de hidrociclones no preparo do carvão (LYNCH; ROWLAND, 2005).

Atualmente os hidrociclones estão inseridos nas mais diversas indústrias como as químicas, petroquímicas, têxtil e metalúrgicas, nas quais seu papel varia desde a purificação da água até a classificação de sólidos, no qual seu baixo custo de operação e manutenção, simples construção e versatilidade são os principais motivos do seu sucesso (JANSE VAN VUUREN et al., 2010).

Em qualquer uma dessas aplicações o desempenho do hidrociclone possui um grande impacto na rentabilidade geral da planta, o que torna essencial a realização de um monitoramento e controle adequado para que o dispositivo entregue o produto desejado (PETERSEN et al., 1996). Apesar do hidrociclone ser estruturalmente simples, sem nenhuma parte móvel, seu monitoramento e controle não são, isso ocorre porque os fenômenos físicos que regem seu funcionamento são complexos e como resultado a administração de seu desempenho depende de modelos teóricos e empíricos (JANSE VAN VUUREN et al., 2010).

Os modelos teóricos e empíricos desenvolvidos apresentam problemáticas, em geral um modelo desenvolvido não pode ser aplicado diretamente sem que haja modificações. Uma vez que os modelos empíricos são caracterizados por serem válidos para uma faixa de condições do hidrociclone e serem específicos de um material (JANSE VAN VUUREN et al., 2010), já os modelos teóricos cobrem uma maior faixa de condições de funcionamento do dispositivo, no entanto a solução dessas equações é feita utilizando *Computational Fluid Dynamic* (CFD) que necessita de um alto poder computacional e tempo (WILLS, 2006).

Mudanças nas condições de operação do hidrociclone alteram seu desempenho (BRADLEY, 1965), idealmente a habilidade de controlar o dispositivo corrigiria esse problema e permitiria o funcionamento adequado desse equipamento. Como atualmente isso não é possível, a inspeção visual é utilizada para supervisionar mudanças nas condições de operação (NEESE et al., 2004a).

O estados de operação do hidrociclone que podem ser observados são: descarga em cone, descarga em *spray* e descarga em cordão, dos quais é possível extrair informações

com relação ao desempenho do hidrociclone e identificação de problemas na operação, esses estados também podem ser melhor trabalhados para o desenvolvimento de mecanismos de controle da planta (NEESE et al., 2004a).

Dessa forma neste trabalho objetiva-se desenvolver um sistema de monitoramento dessas descargas utilizando visão computacional. Para isso foi desenvolvido um algoritmo capaz de extrair dados da descarga inferior, o qual implementado em `c++` utilizando a biblioteca OpenCV. Esse método tem como vantagem o fato de ser não invasivo.

1.1 Motivação

Diversas técnicas para monitorar os estados de operação tem sido desenvolvidas as quais podemos destacar a análise do fenômenos internos através de tomografia (WILLIAMS et al., 1992; GALVIN; SMITHAM, 1994; GUTIÉRREZ et al., 2000), o estudo da concentração de sólidos (NEESE et al., 2004a; GALVIN; SMITHAM, 1994; GUTIÉRREZ et al., 2000) e o desenvolvimento de técnicas para monitorar o *underflow* do hidrociclone (HULBERT, 1993; NEESE et al., 2004a; OLSON; WATERMAN, 2006).

O monitoramento do perfil da saída inferior do hidrociclone utilizando visão computacional também foi estudada (PETERSEN et al., 1996; VAN DEVENTER et al., 2003; NEESE et al., 2004a; JANSE VAN VUUREN et al., 2011). Nele imagens do *underflow* são capturadas e técnicas de processamento digital de imagens são aplicados para extrair informações.

A análise de imagem apresenta características que a tornam um método mais viável, uma vez que ele é não invasivo e possui baixo custo em comparação com as outras técnicas mencionadas anteriormente, o que se torna um fato vital, visto que em uma grande parcela das aplicações industriais múltiplos hidrociclones são associados de diferentes formas para melhorar o desempenho do sistema. Além disso os estudos de Janse Van Vuuren et al. (2011) revelaram uma correlação entre a descarga de partículas do *underflow* com as condições de operação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento utilizando visão computacional. Esse sistema deve ser capaz de extrair o ângulo da descarga, o qual deve ser capaz de acompanhar mudanças no comportamento do sistema em tempo real.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Desenvolver um algoritmo utilizando técnicas de processamento digital de imagens;
- ❖ Implementar esse algoritmo utilizando a biblioteca OpenCV;
- ❖ Verificar o comportamento do sistema através de ensaios;

2 Hidrociclone

Os hidrociclones são dispositivos estacionários de operação contínua utilizados para separar materiais em meio líquido utilizando forças centrífugas para acelerar a taxa de deposição das partículas (WILLS, 2006). Caracterizados por serem pequenos em tamanho, simples em estrutura; não há nada ajustável dentro dos ciclones, além disso possuem uma menor necessidade de manutenção mecânica, torna o hidrociclone um dos equipamentos mais empregados para a indústria (SVAROVSKY, 1984). Apesar de haver várias vantagens ao utilizar hidrociclones, Svarovsky (1984) ressaltou algumas desvantagens:

- ❖ Inflexibilidade: Não é possível ajustar de acordo com as flutuações de fluxo;
- ❖ Limitação no desempenho da separação, em termos de sua seletividade;
- ❖ Necessita de manutenção rotineira do Ápex;
- ❖ Melhor operação com baixa viscosidade;
- ❖ Força cisalhante no seu interior pode contribuir para a quebra de agregados.

Em geral algumas dessas desvantagens podem ser minimizadas ao melhorar as condições de operação, ou realizar pequenas modificações no hidrociclone, como por exemplo associação em série ou em paralelo de hidrociclones para melhorar sua seletividade, entre outros benefícios, normalmente com custos adicionais.

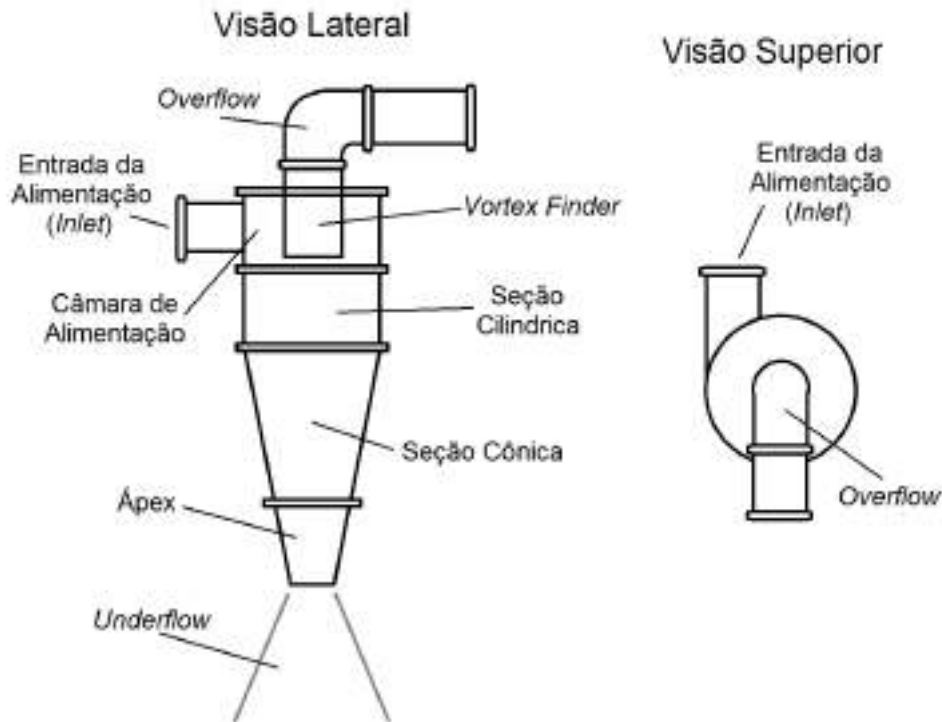
2.1 Estrutura e Funcionamento do Hidrociclone

Os hidrociclones são classificados em famílias, cada qual consiste em um conjunto específico de separadores que mantém entre si proporções constantes e exclusivas de suas principais dimensões geométricas como o diâmetro da parte cilíndrica (VIEIRA, 2006), além disso a depender da aplicação não apenas as dimensões variam, como também os modelos estruturais (BRADLEY, 1965).

O modelo mais comum, como pode ser observado na Figura 1, consiste em um recipiente com formato cônico, aberto no seu ápex, unido a uma estrutura cilíndrica, que possui uma entrada de alimentação tangencial, o topo do cilindro é tampado, o qual é atravessado por outro cilindro de menor raio e que se estende para dentro do corpo do hidrociclone, esse cilindro é chamado de *vortex finder* (WILLS, 2006).

Quando o hidrociclone é alimentado com polpa de minério, resulta como produtos o *underflow* e o *overflow*. O primeiro contém a maior parte das partículas grossas que foram alimentadas e o segundo engloba a maioria das partículas finas que foram classificadas (SAMPAIO, 2007).

Figura 1: Estrutura do hidrociclone.



Fonte: Produzida pelo autor.

Essa alimentação é introduzida sob pressão na entrada do hidrociclone e chega à câmara de alimentação de forma tangencial. Esse bombeamento transforma a energia potencial acumulada na polpa em energia cinética, o qual devido a geometria da estrutura produz um movimento rotacional na polpa, gerando um vórtex e assim tem-se ao longo do eixo vertical a formação do núcleo de ar (WILLS, 2006).

De acordo com a teoria clássica de ação do hidrociclone é que as partículas dentro do fluxo são submetidas a uma força centrífuga e uma força de arrasto de sentidos opostos, como pode ser observado na Figura 2. A força centrífuga desenvolvida acelera as partículas separando assim as partículas de acordo com o tamanho, forma e gravidade específica (WILLS, 2006).

Essa força faz com que as partículas desloquem-se em direção à parede do equipamento, a medida que o fluido entra na parte cônica, maiores são as velocidades de suspensão e com a diminuição da seção na direção do ápex permite que apenas a parte da polpa inicialmente alimentada seja descarregada, dessa forma a parcela que não é descarregada migra para o eixo do equipamento, encontrando o núcleo de ar que possui um movimento rotacional inverso e faz com que as partículas sigam em direção ao *overflow* (CRUZ, 2008; WILLS, 2006).

Figura 2: Forças agindo em uma partícula orbitando o hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Wills (2006).

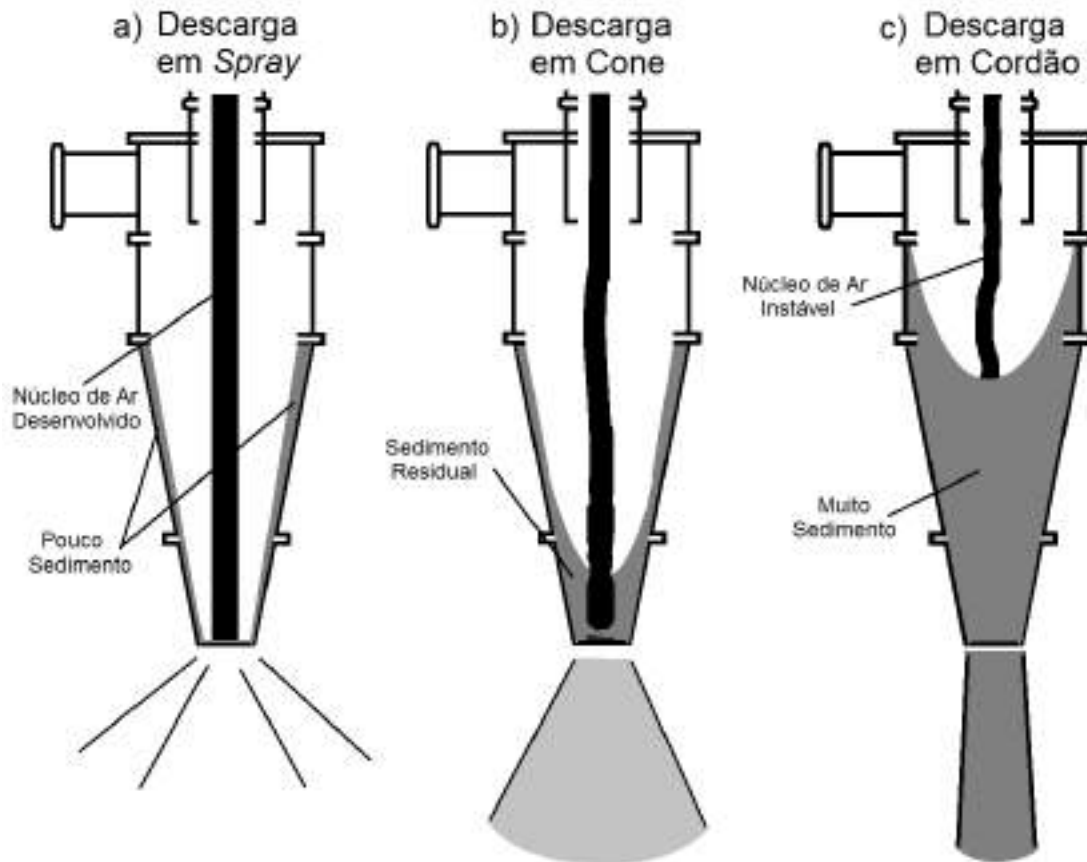
2.2 Estados de Operação

Segundo Neese et al. (2004a) as características do *underflow* do hidrociclone são influenciadas pelos fenômenos físicos que ocorrem em seu interior. Em geral existem três estados distintos, o estado de fluxo diluído, fluxo de transição e o fluxo denso, típicas características que podem ser inferidas através da observação de cada um desses estados como a massa de sedimentos depositada na seção cônica, formação do núcleo de ar e o formato da descarga no *underflow*. A Figura 3 ilustra os três estados de operação, nele é possível observar as mudanças que ocorre em cada um desses estados.

A descarga em *spray* (Figura 3a) é a condição em que há baixa concentração de sólidos na alimentação, dessa forma apenas uma fina camada de sedimento é formada ao longo da seção cônica, o que permite o pleno desenvolvimento do núcleo de ar. Em adição a isso há uma alta taxa de recuperação de sólidos, mas essa baixa concentração faz com que partículas menores que normalmente seriam expelidas pelo *overflow* sejam expelidas no *underflow* (WILLS, 2006).

Na descarga em cordão (Figura 3c), mais sedimentos estão acumulados na seção cônica devido a uma grande concentração de sólidos na alimentação, como resultado há a redução na recuperação de sólidos finos pelo *underflow*, o que aumenta a quantidade de partículas recuperadas pelo *overflow*, no entanto com o ápex obstruído, o núcleo de ar não atravessa o hidrociclone completamente, tornando-se instável e caso isso continue por muito tempo o núcleo de ar pode acabar desaparecendo, resultando em uma situação não desejada afetando a eficiência da separação, pois o acúmulo do sólidos pode entupir completamente o hidrociclone, esse estado pode ser utilizado para monitorar o dispositivo visto que isso indica um problema operacional (NEESE et al., 2004a; WILLS, 2006).

Figura 3: Estados de operação do hidrociclone.

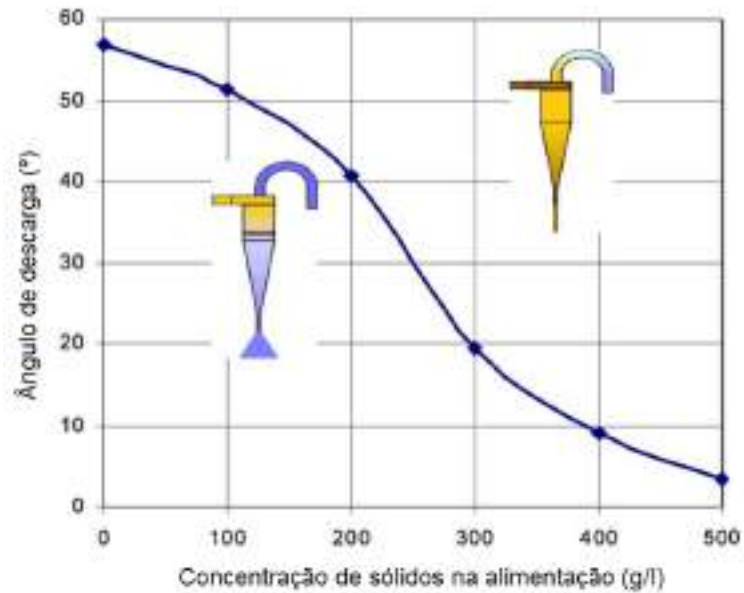


Fonte: Adaptado de Neese et al. (2004a).

Por fim a descarga em cone (Figura 3b), rapidamente alterna entre a descarga em cordão e em spray, essa descarga é conhecida como descarga combinada. O núcleo de ar mantém-se oscilando devido ao sedimentos residuais na seção cônica, o monitoramento desse estado é o mais interessante do ponto de vista da classificação, uma vez que o hidrociclone deve operar próximo da máxima concentração na descarga, esse estado apresenta alta concentração de sólidos no *underflow*, assim como alta taxa de recuperação de sólidos (NEESE et al. 2004a). Segundo Wills (2006) se operado corretamente esse estado de operação deve gerar um cone com 20° a 30° .

Na Figura 4 está apresentado os resultados de uma simulação simplificada feita por Neese et al. (2004b), nele o autor estudou a variação do ângulo em função da concentração de sólidos na entrada para uma vazão fixa, é possível observar que a descarga variou aproximadamente em uma faixa de 0° a 60° .

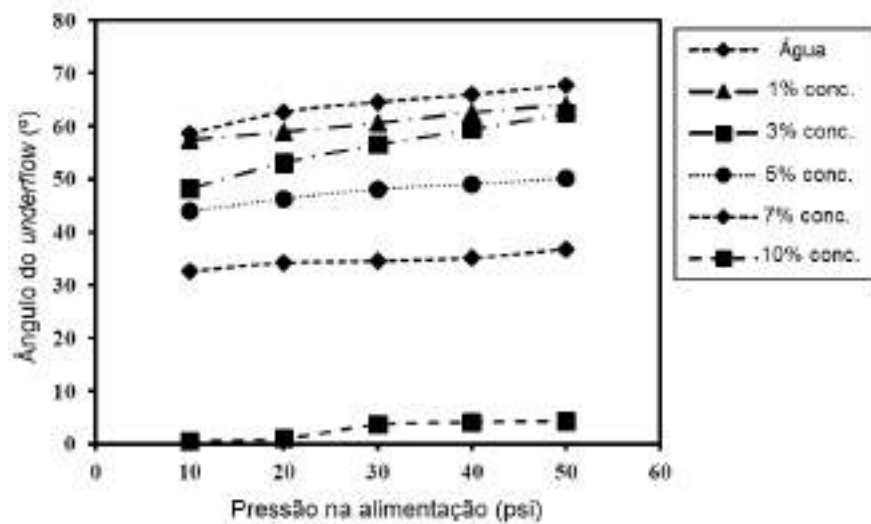
Figura 4: Simulação da variação do ângulo.



Fonte: Adaptado de Neese et al. (2004b).

Deventer et al. (2003) analisou a variação do ângulo da descarga no *underflow* do hidrociclone ao variar a pressão na alimentação, observa-se na Figura 5 que o ângulo variou apenas poucos graus quando comparado a variação em concentração.

Figura 5: Variação do ângulo em função da pressão na alimentação.



Fonte: Adaptado de Deventer et al. (2003).

3 Técnicas de Monitoramento

As condições de descarga no underflow do hidrociclone podem ser utilizadas como indicadores visuais do estado de operação do equipamento, no entanto este não é um método confiável, uma vez que diferentes estados de operação podem ser julgados de forma diferente pelos operadores de acordo com as suas observações visuais, dessa forma é necessário automatizar esse processo.

Múltiplos estudos envolvendo sensores para realizar o monitoramento do hidrociclone vem sendo desenvolvidos, cada um com suas vantagens e desvantagens. Para que a técnica seja considerada adequada para ser utilizada como variável de comando para o controle do hidrociclone, é importante que ela seja não-invasiva, seja capaz de acompanhar as mudanças que ocorrem no sistema em tempo hábil, o que de acordo com sistema de controle estudado por Neese et al. (2004a) deveria apresentar uma taxa de amostragem menor do que 1 segundo.

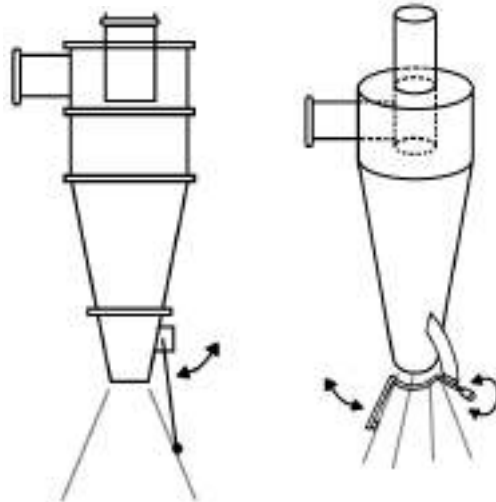
Além disso devido ao ambiente ruidoso em que os hidrociclones operam é necessário que o sistema seja robusto, ou seja, insensível a ofuscamento e estresse mecânico, e por fim é necessário que o custo do equipamento seja baixo, uma vez que são feitas associações entre os hidrociclones para melhorar seu desempenho e dessa forma é necessário monitorar mais de um hidrociclone ao mesmo tempo (NEESE et al., 2004a).

3.1 Detector Mecânico

Inventado e patenteado por Hulbert (2003), esse método consiste em acoplar ao ápex do hidrociclone um braço pivotado, no qual sua ponta é revestida para proteger o dispositivo de descargas mais ásperas. A medição é feita utilizando um detector de ângulo na parte fixa, onde a parte móvel fica em contato direto com a descarga do *underflow*, como pode ser observado na Figura 6.

Apesar dos resultados positivos, o uso contínuo do dispositivo é limitado, como ele está em contato com o *underflow* ocasiona um desgaste fazendo com que seja necessário realizar manutenções e em alguns casos a substituição do equipamento, devido a isso é uma das abordagens menos estudadas (JANSE VAN VUUREN et al., 2011).

Figura 6: Esquemático do detector mecânico.



Fonte: Adaptado de Hulbert (1993).

3.2 Monitoramento por Tomografia

A técnica de tomografia consiste em produzir imagens em cortes transversais que descrevem a variação espacial de um parâmetro físico com base em um conjunto de medições, uma das principais vantagens é que eles são em geral não invasivos e fornecem informações de estruturas complexas (WILLIAMS et al., 1992). Em geral os principais objetos de estudo desse método são a concentração de sólidos na seção cônica e o núcleo de ar formado no interior do hidrociclone.

3.2.1 Tomografia por Raio-X

A tomografia por raio-x implementada por Galvin e Smitham (1994) buscou utilizar técnicas de radiografia para determinar a distribuição da concentração de partículas magnéticas em um ciclone de média densidade. Nele os autores destacam as vantagens da compreensão da distribuição das concentrações em um hidrociclone, isso inclui utilidade no projeto da estrutura, melhorias no funcionamento e a capacidade de validar modelos mais complexos de simulação.

A calibração desse equipamento foi feita utilizando um tubo cilindro de vidro com dimensões próximas com a do dispositivo. Para os ensaios uma chapa de raio-x foi presa atrás do dispositivo que estava a uma distancia focal de 750mm da fonte, com o hidrociclone funcionando com uma pressão na alimentação constante, imagens foram gravadas com diferentes valores de densidade da alimentação.

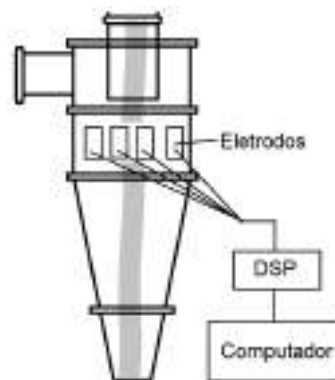
Apesar de ser possível observar a distribuição das partículas, a técnica ainda neces-

sita de melhorias, pois os ensaios foram feitos apenas com materiais metálicos. Além disso para cada captura eram necessários 20 segundos de exposição, o método de calibração e o tratamento de ruído também necessitam de melhorias.

3.2.2 Tomografia por Impedância Elétrica

Tomografia por impedância elétrica que pode medir as dinâmicas do fluxo interno sem que ele seja afetado pela natureza desses fenômenos (GUTIÉRREZ et al. 2000). O experimento consistiu de 16 eletrodos acoplados na região externa da seção cilíndrica do hidrociclone formando um cinto, através de um *DSP* (*Digital Signal Processor*) o sistema coleta as medições de impedância entre quaisquer dois eletrodos, a partir desses dados uma imagem pode ser construída utilizando o algoritmo de reconstrução adequado.

Figura 7: Arranjo dos eletrodos no hidrociclone.



Fonte: Adaptado de Gutierrez et al. (2000).

Gutierrez et al. (2000) utilizaram esse método para medir o tamanho do núcleo de ar, concentração de sólidos no hidrociclone e para incorporar o monitoramento dos estados de operação. Como esperado os resultados apresentaram uma diminuição no núcleo de ar ao aumentar a concentração de sólidos na alimentação. Com relação aos estados de operação, foi possível observar que o tamanho do núcleo de ar está diretamente relacionado aos tipos de descarga no *underflow*.

Essas observações sugerem a viabilidade da implementação dessa técnica no monitoramento de um hidrociclone, uma vez que a topografia por impedância elétrica é não intrusiva, realiza medições a uma taxa de um quadro a cada 2 ms, o qual também adequado para o monitoramento de faltas e pode ser utilizado em simulações fluidodinâmicas computacionais.

3.2.3 Tomografia por Resistência Elétrica

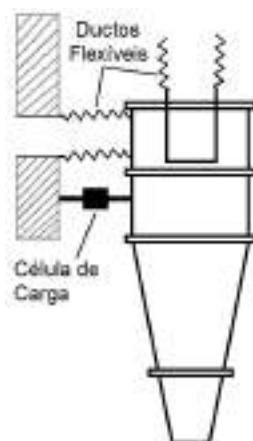
Tomografia por resistência elétrica utiliza a condutividade do material para fazer a reconstrução da parte interna do dispositivo. Bond et al. (1999) e Williams et al. (1992) utilizaram esse método para analisar o comportamento do núcleo de ar dentro do hidrociclone, para isso anéis com eletrodos penetram o corpo equipamento e corrente é injetada entre dois eletrodos, enquanto os outros são usado para medir a tensão gerada, existe uma vantagem desse método em comparação ao tomografia por impedância, pois os eletrodos utilizados por este método são bem menores o que permite acoplar um número maior deles em um anél (WILLIAMS et al., 1992).

Bond et al. (1999) utilizou 8 anéis com 16 eletrodos cada um, esses anéis foram feitos utilizando um molde do hidrociclone. Os resultados deste estudo mostraram que utilizando este método foi possível detectar três diferentes condições de falta que eram: a descarga em cordão, o bloqueio do *underflow* e o desgaste/desacoplamento do ápex. Assim como a tomografia por impedância elétrica a tomografia por resistência elétrica pode ser utilizada para o monitoramento de falta e estudo do núcleo de ar, no entanto dependendo do processo de instalação modificações na estrutura são necessárias.

3.3 Método Gravimétrico

Método estudado por Neese et al. (2004a) e é baseado no fato de que a acumulação de sólidos em um hidrociclone depende da concentração de sólidos na alimentação e também do tamanho das partículas, dessa forma conectou-se uma célula de carga ao hidrociclone e utilizaram ductos flexíveis na conexão da alimentação e no *vortex finder*, essas adaptações podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8: Adaptações para o método gravimétrico.



Fonte: Adaptado de Neese et al. (2004a).

Medir o peso do hidrociclone permite uma forma direta e rápida para determinação do estado de operação, no entanto os sinais apresentaram ruído devido às conexões flexíveis. Esse ruído são gerados pela queda de pressão e montagem, necessitando uma compensação por *software*.

3.4 Monitoramento Acústico

Vibrações podem ser observadas o funcionamento do hidrociclone, essas vibrações são geradas pela natureza do fluxo no seu interior. Além disso instabilidade do núcleo de ar e o impacto das partículas com as paredes do hidrociclone geram oscilações de alta frequência, o que gera ruído na resposta natural do dispositivo. O sistema de medição implementado por Neese et al. (2004a) consistiu de um acelerômetro acoplado ao ápex do hidrociclone, um estágio de amplificação e de um computador para tratar o sinal e obter sua representação em frequência.

Os resultados obtidos indicaram que quando a concentração de sólidos era alta, ou seja, o hidrociclone estava com a descarga em cordão o espectro apresentou componentes com maiores amplitudes em frequências mais baixas (entre 10 e 70 Hz), já a descarga em *spray* apresentou uma maior intensidade entre 100 e 600 Hz.

3.5 Monitoramento por Sensor Capacitivo

Este método estudado por Neese et al. (2004a) consiste em colocar um sensor capacitivo logo abaixo do ápex, esse sensor age como um sensor de proximidade indicando se há ou não uma descarga. Para proteger o sensor uma capa de borracha é colocada nele e um eletrodo é utilizado para compensar as influências da umidade, além disso o sinal gerado por esse sensor é usado como entrada para o sistema de controle da válvula. Devido a sua simplicidade e baixo custo é segundo o autor o método mais empregado para controlar uma bateria de hidrociclones.

3.6 Monitoramento por Análise de Imagens

A descarga do *underflow* é um parâmetro do hidrociclone que pode ser monitorado visualmente e permite ao observador inferir o atual estado do dispositivo. O estudo feito por Petersen et al. (1996) consistiu na captura de imagens utilizando uma *VHSC* (*Video Home System Camcorder*) que foi posicionada a 50 cm do *underflow* para evitar respingos.

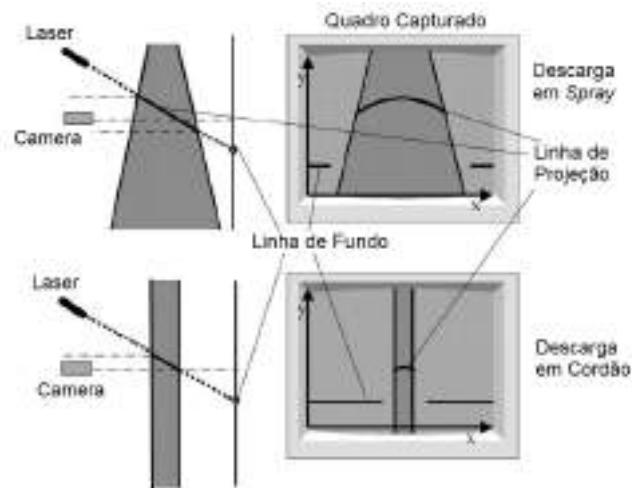
Esses vídeos foram processados utilizando o *MATLAB* em um computador pessoal, no qual apesar dos resultados apresentados terem mostrado que é possível utilizar essa

técnica para realizar o monitoramento, durante a época em que esse estudo foi feito não era possível analisar o vídeo de forma contínua, devido as limitações que os computadores possuíam naquela época.

Van Deventer et al. (2003) continuou os estudos feito por Petersen et al. (1996), nele o autor descreve um modelo semi-empírico que leva em consideração a ação da gravidade na formação da descarga do *underflow*. As observações apresentadas mostraram que é possível obter a partir do ângulo do *underflow* parâmetros como a vazão, pressão de alimentação e a seletividade por tamanho do hidrociclone. O autor também sugere que essa técnica pode ser implementada para gerar as variáveis de comando e dessa forma obter-se um controle eficiente e automático do hidrociclone.

Em 2004, Neese et al. (2004a) propôs o uso de um *laser* com formato de linha para obter imagens da descarga do *underflow*. Esse feixe ao incidir na descarga gera segmentos com comprimento diferente dependendo do estado de operação, na Figura 9 ilustra o sistema implementado. O autor destaca as vantagens desse método que é não invasivo e de baixo custo, no qual o equipamento pode ser posicionado a uma certa distância do equipamento.

Figura 9: Esquemático do sistema de monitoramento com *laser*.



Fonte: Adaptado de Neese et al. (2004a).

O trabalho desenvolvido por Janse Van Vuuren et al. (2011) foi uma extensão do que foi desenvolvido por Petersen et al. (1996) e Van Deventer et al. (2003), nele o autor propôs realizar o monitoramento do formato da descarga do *underflow* utilizando a largura dessa descarga, para isso o sistema realiza a captura de 1800 quadros, que são usados para determinar o limiar de intensidade que será usado para binarizar a imagem, diferentemente de de Petersen et al. (1996) uma linha horizontal da imagem era completamente extraída, como pode ser visto na Figura 10.

Os problemas com ruído na imagem foram minimizados utilizando técnicas de limiarização por movimento e aprimoramento de imagem, no entanto durante os testes realizados o autor destaca a importância de uma fonte de luz focalizada no *underflow*, uma vez que para certos minérios os níveis de ruído camuflaram a diferença de intensidade nos *pixels* pertencentes a descarga.

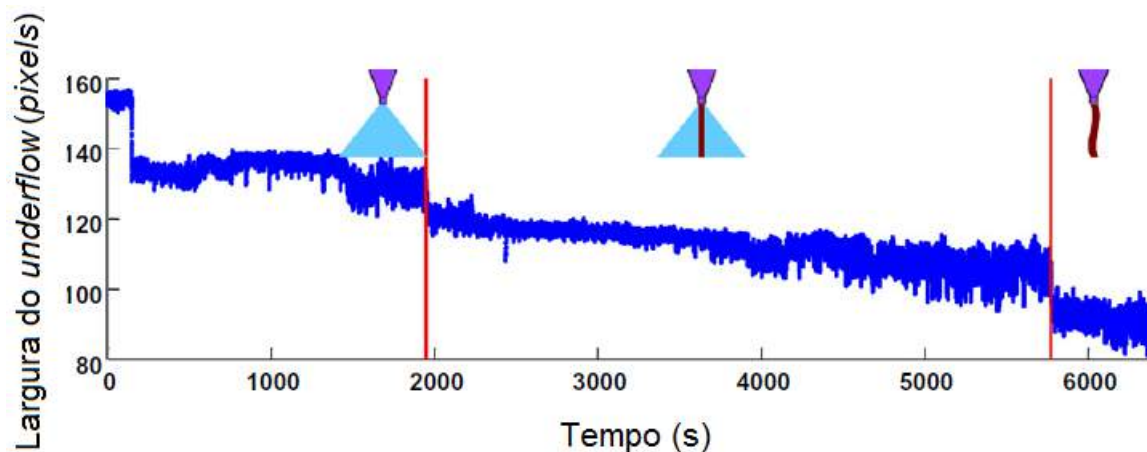
Figura 10: Exemplo da extração da linha horizontal.



Fonte: Adaptado de Janse Van Vuuren et al. (2011).

Na Figura 11 é possível observar os resultados obtidos no ensaio feito por Janse Van Vuuren et al. (2011), nesse ensaio foi feita a variação da concentração de sólidos na alimentação, no qual a largura da descarga foi obtida em função do tempo. As linhas verticais presentes na imagem foram desenhadas pelo autor para facilitar a visualização dos instantes em que houve a mudança no estado de operação. É importante observar que na proximidades do transição de um estado para outro há um aumento considerável na variação.

Figura 11: Resultados da variação do ângulo em função do tempo ao aumentar a concentração.



Fonte: Adaptado de Janse Van Vuuren et al. (2011).

4 Visão Computacional

Visão computacional é um campo que lida com a forma que os computadores interpretam imagens e vídeos digitais, ou seja, suas atividades incluem métodos para processar e extrair dados de imagens, de forma a produzir informação numérica ou simbólica. Esses dados de imagem podem assumir diversas formas, como uma sequência de vídeos, visualização por múltiplas câmeras ou dados multidimensionais de um escaneamento médico.

4.1 Biblioteca OpenCV

O OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) é uma biblioteca de código aberto voltado para visão computacional, foi oficialmente lançado como um projeto de pesquisa desenvolvido pela *Intel Research Russia* em conjunto com a *Intel Performance Library Team* objetivando avançar as aplicações intensivas com processadores, a primeira versão alfa foi apresentada em 2000 e seu lançamento oficial ocorreu em 2006 (BRAHMBHATT, 2013).

Escrita em C e C++ e compatível com os principais sistemas operacionais, projetada com o intuito de ser computacionalmente eficiente com um grande foco em aplicações em tempo real, atualmente conta com mais 40 mil colaboradores e abriga mais de 2500 funções abrangendo diversas áreas da visão computacional como inspeção de produtos de fábrica, segurança, análise médica, calibração de câmera e robótica, uma vez que visão computacional e aprendizado de máquina frequentemente são utilizadas em conjunto o OpenCV também possui uma seção destinada ao aprendizado de máquina (BRADSKI; KAEHLER, 2008).

4.2 Espaço de Cores

O espaço de cor é uma específica organização das cores, o que permite a reprodução de cores tanto de forma analógica, quanto digital, em geral esses modelos são criados por razões práticas, e dessa forma uma grande variedade deles existe (FORSYTH; PONCE, 2011).

Por exemplo o espaço de cores YCbCr é utilizado para realizar a compressão JPEG, já o espaço de cores RGB é um dos mais utilizados quando se deseja reproduzir cores através da incidência de luz, criado a partir da teoria tricromática, as cores desse espaço são geradas a partir de somas ponderadas das intensidades das cores vermelho, verde e azul, no entanto para realizar impressões utiliza-se o CMYK, uma vez que os pigmentos removem a cor da luz incidente, logo a tinta vermelha nada mais é do que um corante que

absorve os comprimentos de onda do verde e do azul e permite que a luz vermelha reflita na superfície.

É possível converter um espaço de cores em um outro espaço de cores, a depender da natureza dessa conversão ela pode ser apenas uma simples transformação linear como o caso de RGB para YCbCr, ou não linear como o caso do RGB para CMYK ou RGB para HSV.

4.3 Filtro Bilateral

O filtro bilateral é uma técnica para suavizar imagens, mas preservando as bordas, utilizada em diversas aplicações como: *denoising*, manejo de tons, edição de texturas, *demosaicking*, estilização e estimação do fluxo óptico, sua origem provém de estudos em filtros Gaussianos não lineares (PARIS et al., 2007).

A convolução de uma imagem com um *kernel* é uma das operações básicas ao filtrar imagens, isso equivale a estimar em cada posição uma média local de intensidade, assim pode-se definir um filtro Gaussiano como sendo:

$$GB[I]_p = \sum_{q \in S} G_\sigma(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) I_q \quad (1)$$

onde G_σ denota o *kernel* Gaussiano bidimensional:

$$G_\sigma(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Assim o filtro Gaussiano é uma média ponderada da intensidade das posições adjacentes, com o peso diminuindo com o aumento da distancia espacial do centro \mathbf{p} . Essa distancia é definida por $G_\sigma(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|)$, onde σ é o parâmetro que define a extensão dessa região, como resultado as bordas são borradas (PARIS et al., 2007).

De forma similar a convolução gaussiana, o filtro bilateral também é definido como uma média ponderada de *pixels*, a diferença é que o filtro bilateral considera a variação de intensidade para preservar as bordas. O raciocínio é se dois *pixels* estão próximos um do outro, no qual não apenas eles ocupam localizações espaciais próximas como também possuem similaridades em sua intensidades (Paris et al., 2007). O filtro bilateral pode ser descrito como:

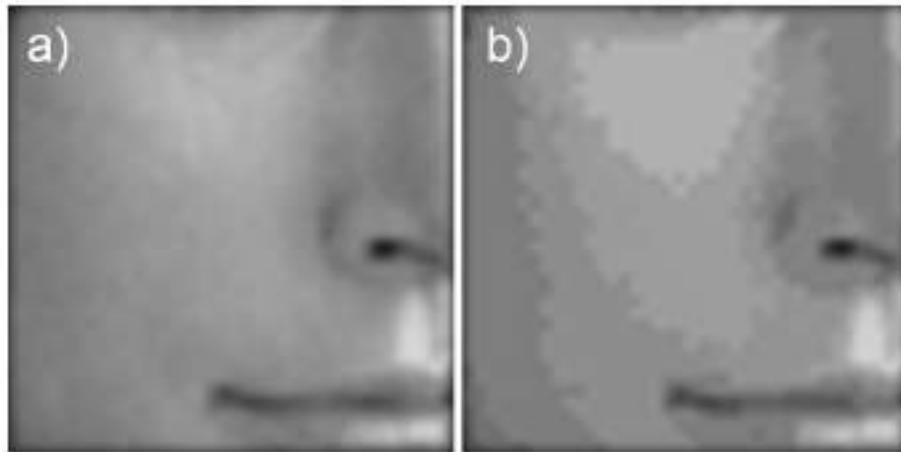
$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q) I_q \quad (3)$$

onde W_p é um fator normalizante dado por:

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q) \quad (4)$$

Os parâmetros σ_s e σ_r que definem o quanto será filtrado da imagem, a Eq. 3 é a versão normalizada da média ponderada, onde G_{σ_s} representa a diminuição da influência de *pixels* mais distantes e G_{σ_r} denota a diminuição da influência do *pixel* \mathbf{q} com um valor de intensidade diferente de I_p . Na Figura 12a tem-se apresentada a imagem original, e na Figura 12 b a imagem após a aplicação do filtro bilateral, é possível observar claramente o efeito “escada” gerado pelo filtro.

Figura 12: Exemplo de aplicação do filtro bilateral.



Fonte: Paris et al. (2017).

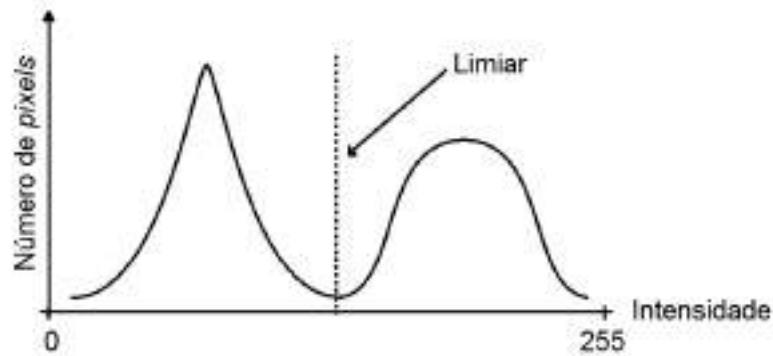
4.4 Binarização de Otsu

A binarização é um dos métodos mais simples de segmentação, no qual uma imagem em tons de cinza pode gerar uma imagem binária. Nele um valor de intensidade arbitrário é definido como limiar de binarização, e através dele é possível separar a imagem em *pixels* pretos e *pixels* brancos, isolando assim o objeto de interesse (BRADSKI; KAEHLER, 2008).

Em geral esse valor de limiar é obtido por tentativa e erro, no entanto existem aplicações em que esse valor de limiar precisa acompanhar as mudanças que ocorrem na imagem que está sendo analisada para que a binarização continue a segmentar corretamente, assim uma das formas de automatizar esse processo é através do método de Otsu, esse algoritmo assume que a imagem a ser binarizada possui um histograma bimodal, ou seja, o histograma apresenta dois picos, assim o limiar de binarização é calculado de

modo que sua dispersão combinada (variação intra-classe) seja mínima, na Figura 13 está ilustrado um histograma bimodal com o limiar ideal destacado (PARKER, 2011).

Figura 13: Ilustração do método de Otsu.



Fonte: Produzido pelo autor.

4.5 Detecção de Bordas de *Canny*

O detector de bordas de *Canny* é um algoritmo de multiestágios desenvolvido por Canny (1986) que é utilizado para detectar bordas e minimizar ruído na imagem. Primeiramente aplicasse um filtro Gaussiano de 5x5 para reduzir componentes de alta frequência que podem resultar em erros na detecção, em seguida a imagem suavizada é convolvida com o *kernel* de *Sobel* horizontal e vertical para obter-se a primeira derivada na horizontal (G_x) e a primeira derivada na vertical (G_y), a partir dessas duas imagens é possível obter o gradiente da borda e a direção de cada pixel de acordo com a Eq. 5 e Eq. 6:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (6)$$

A terceira etapa consiste em afinar os limites gerados pela etapa anterior, para isso todos os valores encontrados são verificados e os *pixels* com valor de gradiente que não sejam máximos locais são removidos, como pode ser observado na Figura 14, nele o ponto A está na borda e a direção do gradiente é normal a borda, os pontos B e C estão na direção do gradiente, assim o ponto A é checado com o ponto B e C para ver se há a formação de um máximo local, se sim, ele é considerado para o próximo estágio, senão ele é removido.

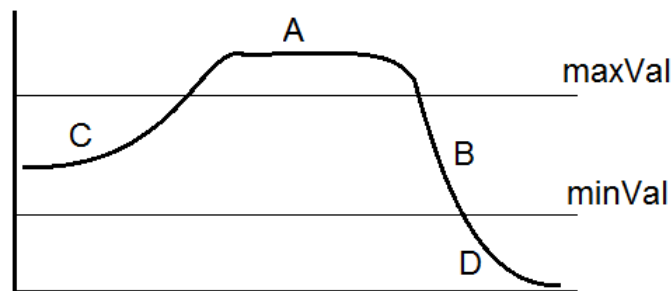
Figura 14: Afinamento das bordas do Canny.



Fonte: Produzido pelo autor.

Este estágio decide quais das bordas são realmente bordas e quais não são, para isso é utilizado o limiar por histerese, nele dois valores são escolhido um valor máximo e um valor mínimo. Qualquer borda que possuir o gradiente de intensidade maior do que o valor máximo é uma borda, os que estiverem abaixo do valor mínimo são descartados e as bordas que estiverem entre o valor máximo e o valor mínimo serão classificadas como bordas ou não de acordo com sua conectividade, caso essa borda esteja conectada com uma borda que esteja acima do valor máximo então ela é considerada, caso contrário ela é removida. Na Figura 15 está representado esse processo para o caso de uma imagem de uma dimensão, nele as bordas C e D são consideradas bordas uma vez que o gradiente de intensidade de A é maior que o valor máximo, enquanto que D é descartado.

Figura 15: Limiar por histerese do Canny.



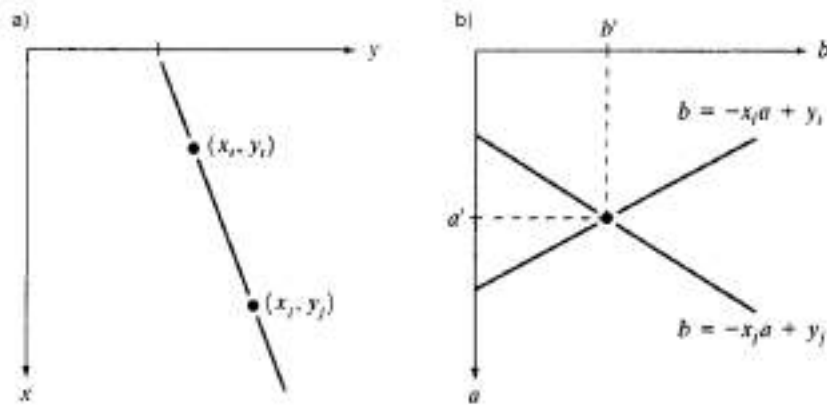
Fonte: Produzido pelo autor.

4.6 Transformada de *Hough*

Um ponto no plano cartesiano pode ser representado por (x_i, y_i) e a equação geral da reta $y_i = ax_i + b$, infinitas retas passam por (x_i, y_i) , no entanto todas elas satisfazem a equação geral da reta ao variarmos a e b . No entanto, escrevendo essa equação como $b = -x_i a + y_i$ e considerando o plano a - b , também chamado de plano paramétrico, denota uma única linha para o par (x_i, y_i) , além disso, um segundo ponto (x_j, y_j) também gera

uma linha no espaço paramétrico, essa linha intercepta a linha associada a (x_i, y_i) em (a', b') , onde a' e b' são os parâmetros de uma linha que contém (x_i, y_i) e (x_j, y_j) no plano xy (GONZALES; WOODS, 2011), a Figura 16 ilustra esses conceitos.

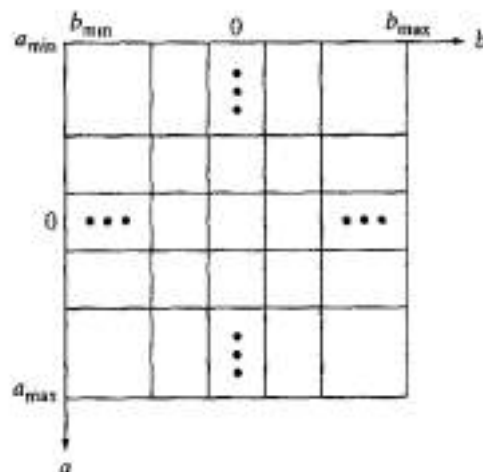
Figura 16: Retas no plano xy e plano ab .



Fonte: Gonzalez e Woods (2011).

A célula de acumulação é a subdivisão do espaço de parâmetros em uma malha de quadrados como pode ser observado na Figura 17, nele $(a_{min}ax, a_{min}in)$ e $(b_{max}ax, b_{max}in)$ representam as faixas esperadas de variação. Para uma célula de coordenadas (i, j) , possui um acumulador $A(i, j)$ correspondente às coordenadas (a_i, b_j) , inicialmente com valor zero. Para cada (x_k, y_k) da imagem, varia-se a e encontra-se b a partir da equação $b = -x_k a + y_k$, os valores de b são então arredondados para a célula mais próxima, caso a escolha de um a_p resulta em um b_q , então o acumulador $A(p, q)$ sofre um incremento. Ao fim os Q pontos em $A(p, q)$ correspondem a Q pontos no plano xy pertencentes a reta $y_i = ax_i + b$.

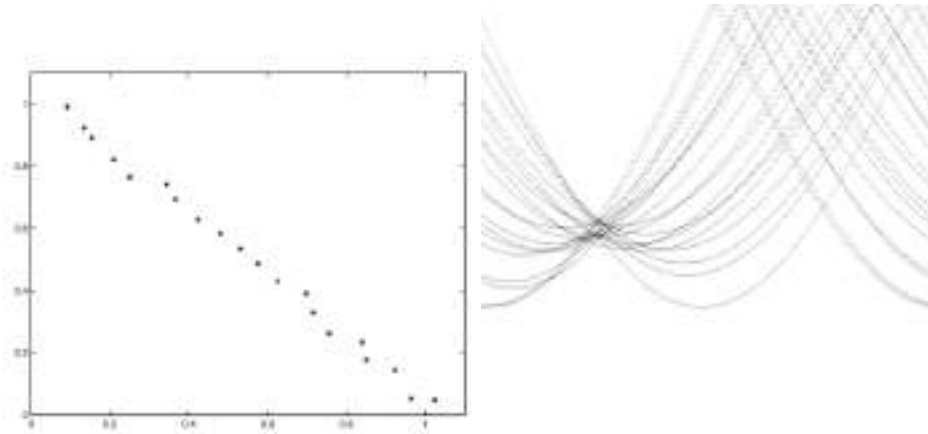
Figura 17: Célula de acumulação.



Fonte: Gonzalez e Woods (2011).

O problema de se utilizar a equação da reta é de que a inclinação tende a infinito quando a reta se aproxima da vertical, uma forma de contornar esse problema é utilizar a representação $x\cos(\theta) + y\sin(\theta) = \rho$, essa representação gera senoides ao invés de retas no plano $p\theta$, para este novo espaço θ varia entre $\pm 90^\circ$ e ρ varia entre $\pm\sqrt{2}D$, onde D é a distância entre dois cantos. Um exemplo disso pode ser observado na Figura 18.

Figura 18: Exemplo do espaço parametrizado.



Fonte: Forsyth e Ponce (2011) .

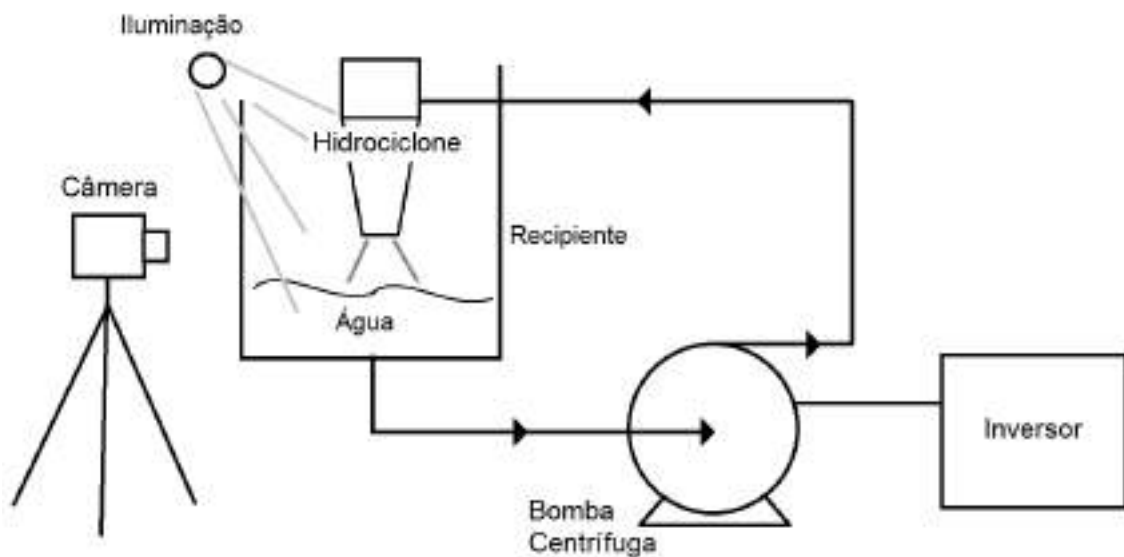
5 Metodologia

Nesta seção são apresentados os procedimentos seguidos para realização da parte experimental deste trabalho, o que inclui uma descrição da planta utilizada para a realização dos ensaios, assim como o detalhamento do algoritmo utilizado.

5.1 Estrutura Mecânica

A planta utilizada para a realização dos experimentos consistiu de uma câmera apoiada por um tripé e posicionada de frente para um reservatório de água feito de vidro, o qual está conectada a uma bomba centrífuga responsável por gerar o fluxo de alimentação do hidrociclone e um inversor para realizar o controle dessa bomba, o esquemático dessa planta pode ser observado na Figura 19.

Figura 19: Esquemático da planta.



Fonte: Produzido pelo autor.

A iluminação durante os ensaios apresentou um grande impacto durante o processo de binarização, através deles determinou-se que as melhores posições do ponto de iluminação ocorram ao iluminar lateralmente o *underflow* e ao posicionar o ponto de iluminação acima da câmera e focalizando no *underflow*.

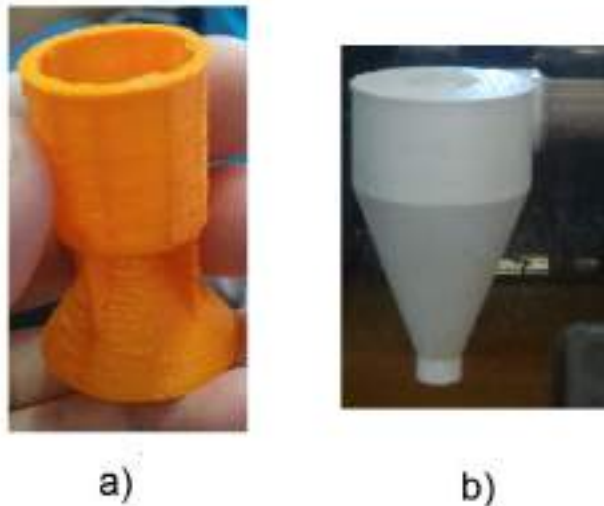
5.2 Materiais

Foram feitas duas peças na impressora 3D com o intuito de simular o comportamento do *underflow* de um hidrociclone. A peça apresentada na Figura 20a foi feita para

gerar uma descarga com um ângulo de 30° fixo de forma que ela possa ser utilizada para validação das capturas, durante os testes no entanto foi observado uma curvatura devido a ação da gravidade e por essa peça não permitir que houvesse uma velocidade tangencial.

A peça que pode ser observada na Figura 20b é uma versão em miniatura de um hidrociclone e foi construída no intuito de reproduzir o comportamento do hidrociclone dentro das limitações da planta. De acordo com os resultados obtidos por Deventer et al. (2003) e que foram apresentados na Figura 5 o sistema é insensível a variações na vazão o que limitou os teste com essa reprodução em escala reduzida.

Figura 20: Peça impressas para realização dos testes.



Fonte: Produzido pelo autor.

A câmera utilizada no esquemático foi a câmera *Sony PS3-Eye*, ela permite a captura de quadros com resolução de 640×480 e 320×240 com uma taxa de 30 quadros por segundo, além disso é possível configurar manualmente a exposição e o ganho da lente, na Figura 21 é possível visualizar uma foto da câmera. Além dela alguns ensaios foram feitos utilizando vídeos gravados com as câmeras presentes em celulares.

Figura 21: Câmera utilizada.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 22 pode ser observada a placa de identificação da bomba (Figura 22a) e do inversor (Figura 22b). A bomba utilizada na planta foi de 1,5 CV, 3400 rpm e conectado a alimentação através do inversor.

Figura 22: Câmera utilizada.



Fonte: Produzido pelo autor.

5.3 Algoritmo

Na Figura 23 está representado o fluxograma do algoritmo implementado em *OpenCV*. Durante os ensaios a turbulência da descarga apresentou falhas na etapa de binarização, uma forma de contornar esse problema foi diminuir a resolução dos quadros capturados para 320x240 eliminando assim as variações de luminosidade na descarga e permitindo uma binarização mais adequada.

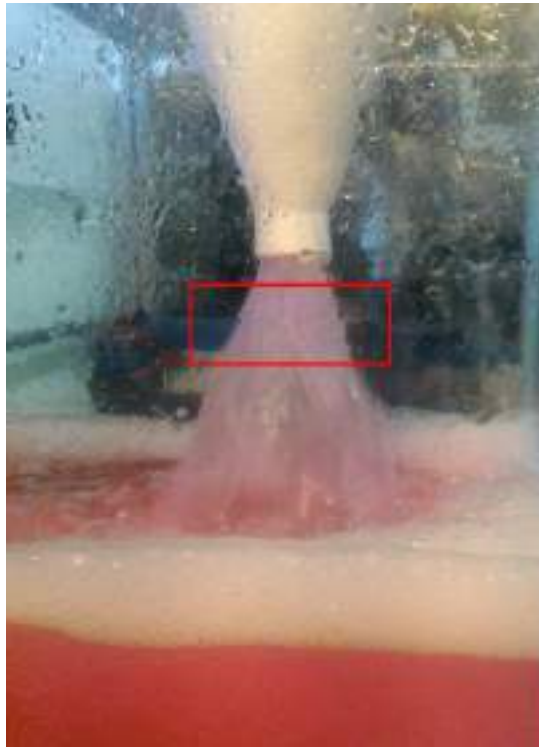
Figura 23: Fluxograma.



Fonte: Produzido pelo autor.

A etapa de extração da região de interesse é feita de forma a isolar o objeto de interesse e limitar a quantidade de pixel processadas é feito uma seleção da região de interesse. Esse processo reduz o tempo de processamento uma vez que grande parte da imagem foi eliminada, essa região pode ser observada na Figura 24. A região é escolhida de forma manual, procurando evitar as zonas que apresentam curvaturas, como foi destacado na Figura 10.

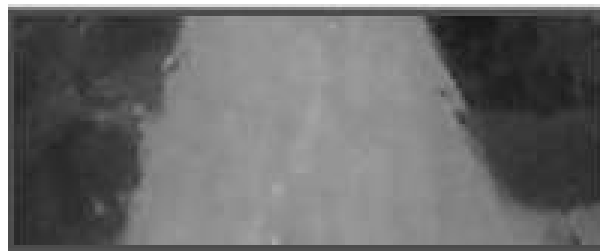
Figura 24: Extração da região de interesse.



Fonte: Produzido pelo autor.

Em seguida a imagem é convertida para tons de cinza, uma vez que o objeto de interesse está destacado por intensidade e não por cores. A conversão do espaço de cores RGB para a escala de cinza reduz a quantidade canais de cores utilizados, reduzindo o tempo de processamento.

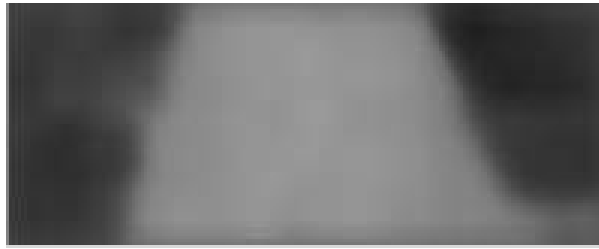
Figura 25: Imagem em tons de cinza.



Fonte: Produzido pelo autor.

Um filtro bilateral é aplicado na imagem convertida para diminuir o ruído causado pelas gotículas e suavizar a descarga para facilitar o processo de binarização, o resultado pode ser observado na Figura 26.

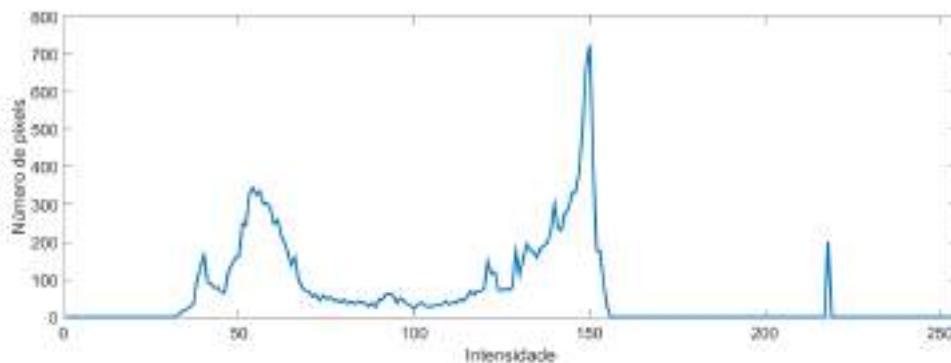
Figura 26: Resultado da aplicação do filtro bilateral.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 27 está apresentado o histograma da região resultante da aplicação do filtro bilateral, essa imagem apresenta picos o que está de acordo com o histograma bimodal esperado.

Figura 27: Histograma da imagem após o filtro bilateral.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para separar o objeto de interesse, o cone formado pelo fluído que sai do hidrociclone do fundo da imagem foi utilizada a binarização de Otsu, a vantagem de se utilizar essa técnica é que ela ajusta o limiar de acordo com o histograma da imagem, permitindo assim que o limiar de binarização mantenha-se coerente mesmo com variações de luz ao longo do dia.

Como algumas gotículas entre outros resíduos ainda aparecem na imagem binarizada utiliza-se os filtros morfológicos de erosão e dilatação, sendo realizado primeiramente uma abertura da imagem (erosão seguida de dilatação) e após um fechamento da imagem (dilatação seguida de erosão).

A operação abertura é utilizada para remover pequenos objetos de uma imagem preservando a forma e o tamanho dos objetos grandes. Por sua vez, a operação fechamento é utilizada para unificar elementos eliminando os vazios entre eles. Na Figura 28 pode-se observar o resultado obtido após essa etapa.

Figura 28: Binarização da imagem.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para se aplicar a transformada de Hough é preciso após a etapa de binarização realizar o processo de detecção de bordas, caso contrário é possível que a transformada encontre valores incoerentes. A detecção de bordas foi feita utilizando o detector de bordas de Canny, o resultado pode ser observado na Figura 29.

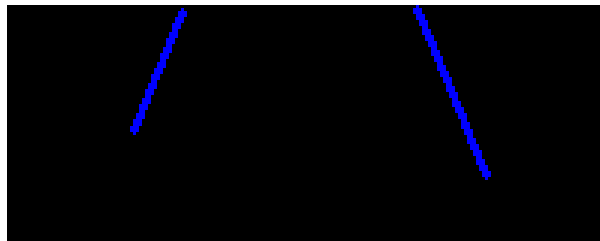
Figura 29: Resultado da detecção de bordas de Canny.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para extrair o ângulo desse cone utilizou-se a transformada de Hough, a Figura 30 apresenta a aplicação dessa transformada, assumindo que o cone possui uma simetria é feita a média do ângulo da reta da direita com a da esquerda.

Figura 30: Resultado transformada de hough.



Fonte: Produzido pelo autor.

6 Resultados

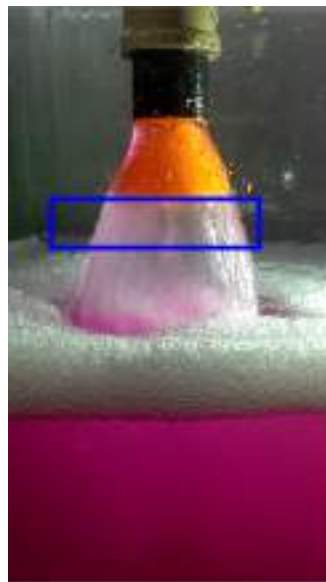
Como forma de validar o projeto o algoritmo desenvolvido foi testado através de ensaios, nos primeiros dois ensaios são feitos de forma que o ângulo obtido seja fixo para que seja feita a análise da coerência dos dados obtidos, nos ensaios restantes as descargas apresentam comportamento mais similar ao do hidrociclone, durante os testes realizados o tempo de execução do programa oscilava entre 15 e 25 ms devido a natureza aleatória da transformada de Hough.

Nos ensaios com a planta utilizou-se um fluido composto apenas de água e a vazão foi mantida constante, já os ensaios com a planta piloto da UFOP a concentração de sólidos foi variada para cada um dos estados de operação.

6.1 Teste com Descarga de 30°

Na Figura 31 está apresentada um quadro do video gerado por esse experimento, nele a região de interesse aparece destacada por um retângulo azul.

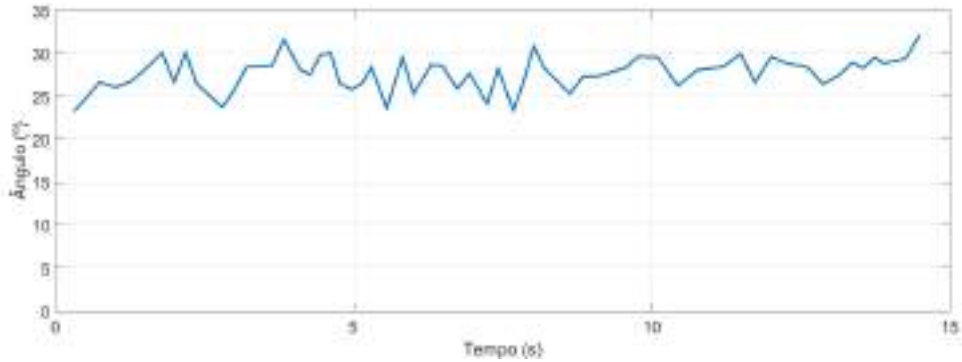
Figura 31: Descarga de 30°



Fonte: Produzido pelo autor.

Os resultados desse ensaio podem ser observadas na Figura 32, a média obtida foi de 27° o que é aceitável considerando que há uma curvatura nessa descarga e não necessariamente o fluido acompanha o formato da peça.

Figura 32: Resultados do ensaio com peça de 30°.



Fonte: Produzido pelo autor.

A tabela 1 apresenta um resumo estatístico do dados obtidos.

Tabela 1: Dados estatísticos do ensaio com peça de 30° fixo.

Média	Desvio Padrão
27,7404	1,9655

É importante observar que uma fonte de iluminação foi colocada lateralmente para facilitar o processo de binarização, na Figura 33 é possível observar que a descarga não foi iluminada e dessa forma a binarização não ocorreu da forma desejada.

Figura 33: Problema encontrado durante o ensaio.



Fonte: Produzido pelo autor.

6.2 Teste com Descarga de 0°

Para este teste a peça que força o ângulo de 30° foi retirada e dessa forma o fluido caía de forma reta (Figura 34).

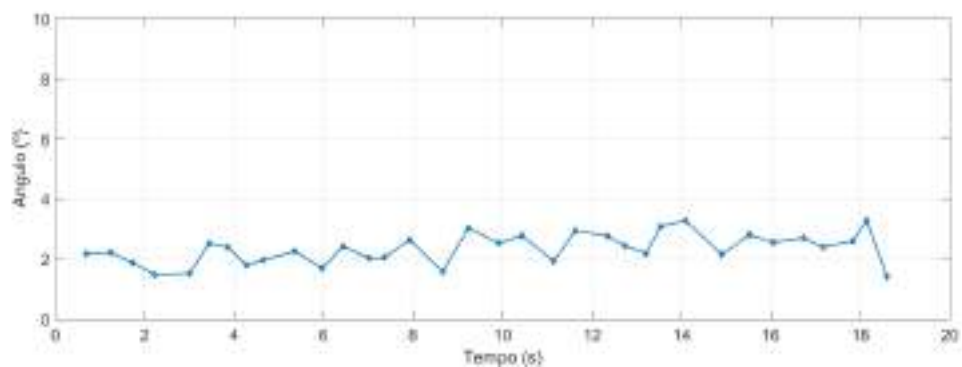
Figura 34: Descarga de 0°.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para esse ensaio considerou-se apenas o lado esquerdo da descarga, visto que o lado direito apresentou um comportamento irregular, os resultados desse ensaio estão apresentados na Figura 35, os valores obtidos na tabela 2 são coerentes com o que era esperado.

Figura 35: Resultados do ensaio com descarga de 0°.



Fonte: Produzido pelo autor.

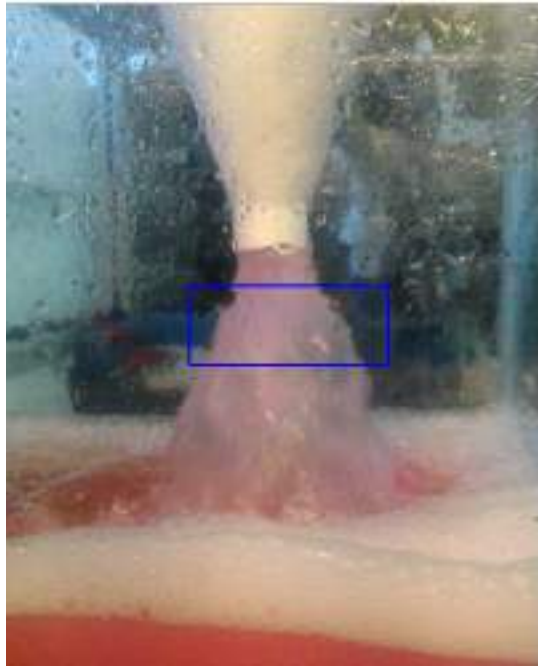
Tabela 2: Dados estatísticos do ensaio com peça de 0° fixo.

Média	Desvio Padrão
2,3363	0,5086

6.3 Teste com Miniatura do Hidrociclone

Os ensaios feitos com a miniatura do hidrociclone foram todos feitos com vazão constante, diferentemente dos ensaios anteriores a descarga apresentou turbulência o que aumenta a complexidade do monitoramento do *underflow*.

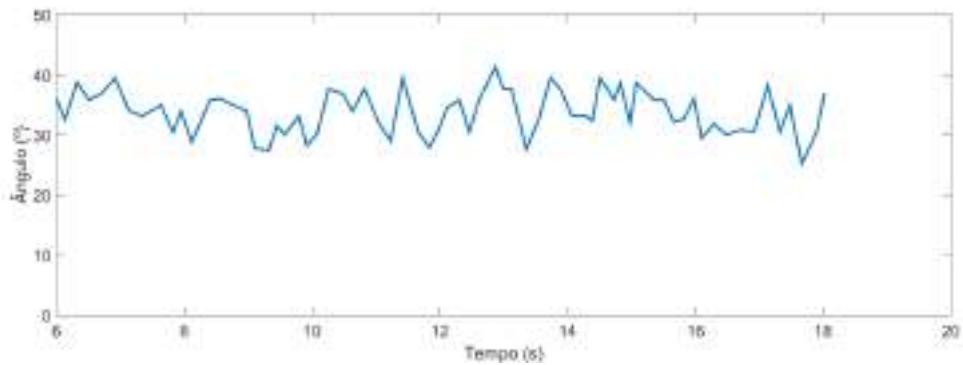
Figura 36: Ensaio com hidrociclone em miniatura.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 36 apresenta um quadro no qual é possível notar uma significativa diferença no comportamento da descarga. Durante a filmagem desse ensaio ocorreu um deslocamento na câmera o que influenciou nos resultados, na Figura 37 é apresentado um gráfico com os dados obtidos e na tabela 3 há um resumo estatístico, comparado com os outros ensaios este foi o que apresentou o maior desvio padrão, uma possível causa é devido ao ambiente em que esse ensaio foi realizado ter apresentado um alto nível de ruído.

Figura 37: Ensaio com hidrociclone em miniatura.



Fonte: Produzido pelo autor.

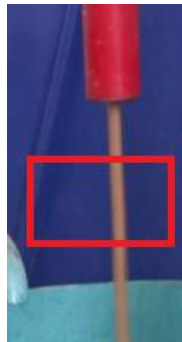
Tabela 3: Dados estatísticos do ensaio com hidrociclone em miniatura.

Média	Desvio Padrão
31,5618	5,7112

6.4 Planta Piloto da UFOP

Os ensaios feitos com vídeos da planta piloto da Universidade Federal de Ouro Preto permitiram analisar o comportamento do algoritmo para a descarga em cordão, descarga em cone e descarga em transição do cone para o cordão, esses vídeos foram gravados com uma taxa de 25 quadros por segundo com uma resolução de 1440x1080 *pixels*.

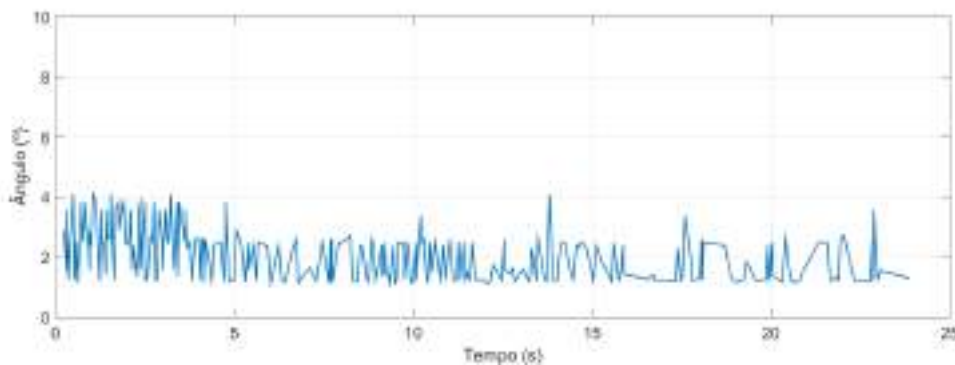
Figura 38: Hidrociclone com descarga em cordão.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 38 é possível visualizar um quadro capturado, neste ensaio o hidrociclone está operando com uma alta concentração de sólidos na sua alimentação. Os resultados desse experimento podem ser observados na Figura 39, a escala do ângulo foi reduzida para que houvesse uma melhor visualização das oscilações.

Figura 39: Resultados obtidos com a descarga em cordão.



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4: Dados estatísticos do ensaio com descarga em cordão..

Média	Desvio Padrão
2,0312	0,8300

O segundo vídeo analisado, consiste no hidrociclone com descarga em cone, na Figura 40 a descarga apresenta uma angulação maior do que a do cordão, além disso pela diferença de cor quando comparado com a descarga em cordão é possível inferir que há uma concentração menor de sólidos.

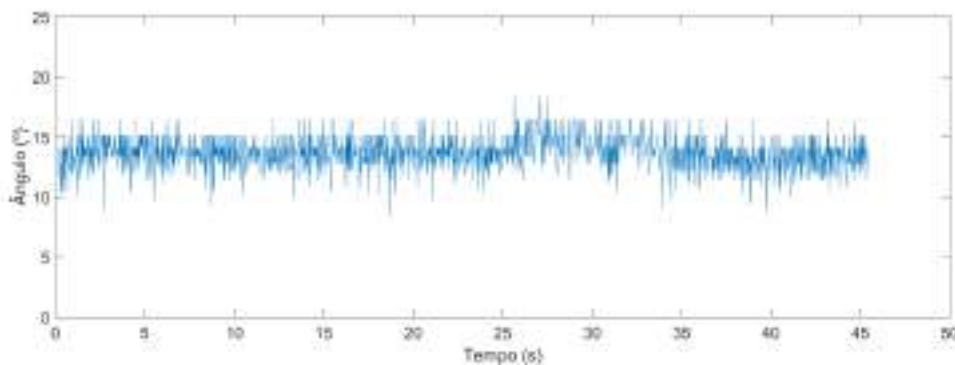
Figura 40: Hidrociclone com a descarga em cone.



Fonte: Produzido pelo autor.

A análise desse vídeo pode ser observada na Figura 41, assim como esperado o ângulo médio obtido foi maior do que no ensaio anterior.

Figura 41: Resultados obtidos com a descarga em cone.



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 5: Dados estatísticos do ensaio com a descarga em cone.

Média	Desvio Padrão
13,5956	1,2742

A descarga em transição diferentemente dos outros dois ensaios apresentou variações muito mais bruscas, uma vez que o sistema está alternando entre a descarga em

cordão e a descarga em cone, é possível observar essa variação na Figura 42, nessa imagem está representado a variação da descarga em quadros consecutivos.

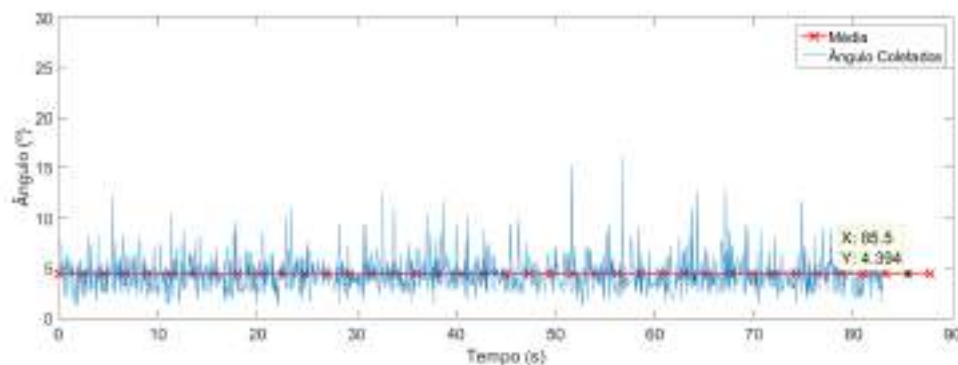
Figura 42: Hidrociclone com a descarga em transição.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 43 é possível observar picos correspondentes aos instantes em que houve uma mudança brusca de ângulo.

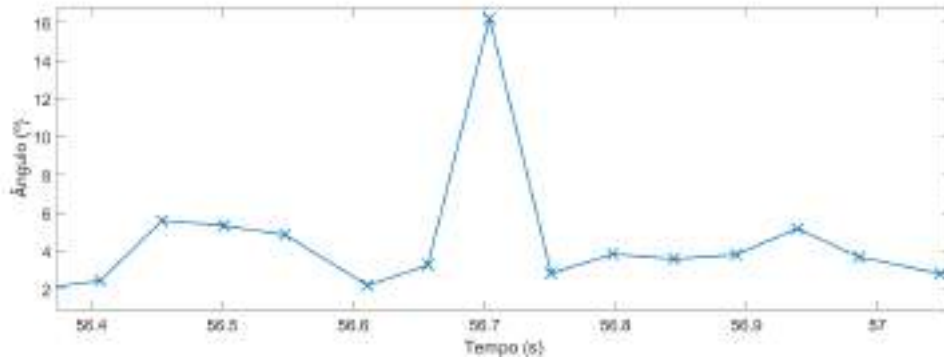
Figura 43: Resultados obtidos com a descarga em transição.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para melhor visualização foi feita uma ampliação em uma dessas variações, na Figura 44 foram destacados os instantes em que foi feita a captura, note que a ocorrência desses picos não ocorre de uma forma mais suave devido a taxa de quadros com a qual o vídeo foi capturado.

Figura 44: Destaque para o instante em há um pico.



Fonte: Produzido pelo autor.

Da Tabela 6, como se era esperado esse ensaio apresentou o maior desvio padrão dentre os ensaios feitos com a planta piloto da UFOP.

Tabela 6: Dados estatísticos do ensaio com a descarga em transição.

Média	Desvio Padrão
4,3942	3,7017

7 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma nova proposta para realizar o monitoramento dos estados de operação de um hidrociclone utilizando a transformada de *Hough* como forma de medir o ângulo da descarga do *underflow*.

O sistema testado em ambiente laboratorial apresentou coerência na obtenção dos ângulos forçados, apesar de os ensaios terem sido feitos em um sistema de fase única houve problemas na etapa de binarização do sistema. Uma vez que como não há sólido, e a geração do cone não ocorre através de um fluxo rotacional, parte da descarga se tornou praticamente transparente. Além disso devido a ação da gravidade a descarga assumiu um comportamento mais curvo.

Os ensaios com o hidrociclone com dimensões reduzidas permitiu a análise do comportamento do algoritmo quando exposto a um ambiente mais ruidoso, apesar desse ensaio ter resultado no maior desvio padrão os valores obtidos foram coerente, uma vez que a turbulência criada pela própria peça gerava variações na descarga.

A análise feita com os vídeos da planta piloto da UFOP permitiu avaliar o desempenho do algoritmo para um comportamento mais próximo do real, o sistema apresentou coerência nas medições, e foi capaz de acompanhar o comportamento do hidrociclone com a descarga em transição.

Apesar do resultados terem atingido os objetivos estabelecidos é necessária a realização de testes em plantas industriais, nas quais o sistema estará expostos a um ambiente mais ruidoso. Além disso a implementação desse algoritmo em um sistema embarcado permitiria uma versão compacta para realização do monitoramento e posteriormente, como uma forma de controlar a planta.

Referências

- BOND, J.; JIA, X.; WEST, R. M.; WANG, M.; CULLIVAN, J. C.; WILLIAMS, R. A.; FAULKS, I.; DYAKOWSKI, T.; WANG, S. J.; CLIMPSON, N.; KOSTUCH, J. A.; PAYTON, D.. **Industrial monitoring of hydrocyclone operation using electrical resistance tomography**. *Minerals Engineering*, 12: 1245-1252. 1999.
- BRADSKI, G., KAEHLER, A. **Learning OpenCV**, 1ª ed. Sebastopol, Russia: O'Reilly, 2008.
- BRAHMBHATT, S. **Practical OpenCV**. 1ª ed. Nova Iorque: Apress, 2013
- CANNY, J., **A Computational Approach To Edge Detection**, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6):679–698, 1986.
- CRUZ, O. C. da. **Desempenho de um Hidrociclone de Geometria “Rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação**. 2008. 80f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2008.
- FORSYTH, D. A.; PONCE, J.. **Computer Vision: A Modern Approach**. 2ª ed., Pearson. 2011
- GALVIN, K. P.; SMITHAM, J. B.. **Use of X-rays to determine the distribution of particles in an operating cyclone**. *Minerals Engineering*, 7: 1269-1280. 1994.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.. **Digital Image Processing**. 3ª ed. *Pearson Education*, 2011.
- GUTIÉRREZ, J. A.; DYAKOWSKI, T.; BECK, M. S.; WILLIAMS, R. A.. **Using electrical impedance tomography for controlling hydrocyclone underflow discharge**. *Powder. Technology*, 108: 180-184. 2000.
- HULBERT, D. G.. **Measurement methods and apparatus for hydrocyclones**. Patente EP0522215A3, Randburg, 1993.
- JANSE VAN VUUREN, M. J.; ALDRICH, C.; AURET, L.; BEZUIDENHOUDT, C.; DE JAGER, C.. **Online Monitoring of Hydrocyclones by Use of Image Analysis**, *13th Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Cidade do Cabo, Africa do Sul, Agosto 2-4, 2010.
- LYNCH, A. J.; ROWLAND, C. A.. **The History of Grinding** 1ª ed. Estados Unidos: *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc (SME)*, 2005. MACHADO, A. F.. **The role of hydrocyclones in mineral processing**. *Filtration & Separation*, 29: 479, 1992.

- NEESE, T.; SCHNEIDER, M.; GOLYK, V.; TIEFEL, H. **Measuring the operating state of the hydrocyclone.** *Minerals Engineering* 17, 2004a.
- NEESE, T.; SCHNEIDER, M.; DUECK, J.; GOLYK, V.; BUNTENBACH, S.; TIEFEL, H.. **Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge.** *Minerals Engineering* 17, 2004b.
- OLSON, T. J.; WATERMAN, R. J.. **Hydrocyclone Roping Detector and Method.** Patente US6983850B2, Tuscon. 2006.
- PARIS, S.; KORNPORST, P.; TUMBLIN, J.; DURAND, F.. **A gentle introduction to bilateral filtering and its applications.** ACM SIGGRAPH 2007 courses (SIGGRAPH '07). ACM, Nova Iorque, Estado Unidos, 2007.
- PARKER, J. R.. **Algorithms for Image Processing and Computer Vision.** 2^a ed., Indiana, Estados Unidos: Wiley. 2011.
- PETERSEN, K. R. P.; ALDRICH, C.; VAN DEVENTER, J. S. J.; McINNES, C.; STANGE, W. W.. **Hydrocyclone Underflow Monitoring Using Image Processing Methods,** *Minerals Engineering*, 9: 301-315, 1996.
- SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O.. **Ensaio de classificação em hidrociclone.** Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 139-154.
- SVAROVSKY, L.. **Hydrocyclones.** Londres: *Holt, Rinehart and Winston Ltd*, 1984.
- VAN DEVENTER, J. S. J.; FENG, D.; PETERSEN, K. R. P.; ALDRICH, C. **Modeling of hydrocyclone performance based on spray profile analysis.** *International Journal of Mineral Processing*, 70: 183-203. 2003.
- VIEIRA, L.G.M.. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes.** 2006. 298f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- WILLIAMS, R. A.; DICKIN, F. J.; DYAKOWSKI, T.; ILYAS, O. M.; ABDULLAH, Z.; BECK, M. S.. **Looking into mineral process plant?** *Minerals Engineering*, 5: 867-881, 1992.
- WILLS, B. A.. **Wills' Mineral Processing Technology: An introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Processing.** 7^a Ed. Oxford: *Butterworth-Heinemann*, 2006.