



Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Minas



Leandro Russo de Araujo

Malhas de Controle Típicas no Beneficiamento a Úmido de Minério de Ferro

Ouro Preto (MG)

2010



Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Minas



Leandro Russo de Araujo

Malhas de Controle Típicas no Beneficiamento a Úmido de Minério de Ferro

Monografia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Beneficiamento Mineral.

Orientador: Prof. José Aurélio Medeiros da Luz

Ouro Preto (MG)

2010

RESUMO

A crescente exaustão de minas com alto teor de minério de ferro tem levado as usinas de beneficiamento desse minério a operarem com margens operacionais cada vez mais estreitas, a partir da necessidade de concentrar minérios com teores mais baixos. Esse novo cenário, contrastando com o período de abundância no qual grande parte das usinas e dos equipamentos nelas utilizados foram concebidos, exige maior eficiência no processamento, de forma a extrair mais mineral de interesse utilizando-se os mesmos recursos disponíveis (insumos e matéria prima). Uma das formas de se alcançar essa eficiência, e sem a necessidade de grandes investimentos de capital, é o emprego adequado de estratégias de controle de processo. O presente trabalho visa o estudo de diferentes estratégias de controle típicas de uma unidade de beneficiamento de minério de ferro, visando à identificação dos padrões mais eficientemente empregados numa usina. Nesse estudo, foram considerados os equipamentos mais comuns no processamento da polpa do minério, ou seja, a via úmida. Para cada estágio estudado, serão analisadas e identificadas as variáveis típicas que compõem a malha de controle, assim como os principais instrumentos necessários para atenderem ao objetivo de controle proposto.

ABSTRACT

The increasing depletion of high content iron-bearing ores has leading dressing plants to operate every time with narrower operational margin, with the increasing necessity to process low grade iron ores. This new scenario, contrasting with the abundance period on which the majority of the plants and their equipments have been designed, demand greater process efficiency, forcing it to extract more valuable mineral with the same amount of available resources (raw material). One possible way to achieve this efficiency, without the necessity of great capital investments, is the adequate usage of control loop strategies. The present study aims to analyze different typical control loop strategies of an typical iron ore plant, looking for an efficient pattern. This study was conducted through the iron slurry processing. For each studied stage, the typical variables that compose a control loop will be analyzed, as so some important needy instruments to attend the objective.

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Sistema Para Medição da Altura da Camada de Espuma	16
Figura 2-2: Medição de <i>Hold up</i> de Ar.....	20
Figura 4-1: Esquema Típico de Um Espessador.....	29
Figura 5-1: Hidrociclones.....	35
Figura 5-2: Efeito da Pressão no D50	38
Figura 5-3: Efeito da % de Sólidos no D50	39
Figura 6-1: Filtro a Disco	43
Figura 7-1 - Separador Magnético Jones	46

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Malha de Controle do Nível da Polpa.....	17
Tabela 2 - Malha de Controle de Adição de Água de Lavagem	17
Tabela 3 - Malha de Controle de Adição de Ar - Alternativa 1.....	18
Tabela 4 - Malha de Controle de Adição de Ar - Alternativa 2.....	19
Tabela 5 - Malha de Controle de pH	21
Tabela 6 - Malha de Controle de Adição de Amido – Alternativa 1	23
Tabela 7 - Malha de Controle de Adição de Amido – Alternativa 2	23
Tabela 8 - Malha de Controle de Adição de Amina.....	24
Tabela 9 - Malha de Controle da Velocidade da Bomba	31
Tabela 10 - Malha de Controle de Adição de Coagulante.....	32
Tabela 11 – Malha de Controle de Adição de Floculante.....	33
Tabela 12 - Malha de Controle de Pressão nos Hidrociclones – Alternativa 1	40
Tabela 13 - Malha de Controle de Pressão nos Hidrociclones – Alternativa 2.....	41
Tabela 14 - Malha de Controle de Densidade da Alimentação dos Hidrociclones	41
Tabela 15 - Malha de Controle de Vácuo.....	44
Tabela 16 - Malha de Controle de Rotação dos Dicos.....	45
Tabela 17 - Malha de Controle de Densidade da Alimentação do Separador Magnético.....	48
Tabela 18 - Malha de Controle de Pressão de Água de Lavagem.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. FLOTAÇÃO	11
2.1 Processo.....	11
2.2 Objetivos de Controle.....	11
2.3 Malhas de Controle Típicas.....	14
2.3.1 Controle do Nível de Polpa.....	15
2.3.2 Controle de Adição de Água de Lavagem	17
2.3.3 Controle de Adição de Ar.....	18
2.3.4 Controle de pH	21
2.3.5 Adição de Amido.....	21
2.3.6 Adição de Amina.....	24
2.4 Tendências	24
3. CÉLULAS MECÂNICAS CONVENCIONAIS	25
4. ESPESSAMENTO	28
4.1 Processo.....	28
4.2 Malhas de Controle Típicas.....	30
4.2.1 Velocidade da Bomba.....	30
4.2.2 Adição de Coagulante	31
4.2.3 Adição de Floculante	32
4.3 Intertravamentos.....	34
5. HIDROCICLONES.....	34
5.1 Processo.....	34
5.2 Malhas de Controle Típicas.....	39
5.2.1 Controle de Pressão nos Hidrociclones.....	39
5.2.2 Controle da Densidade de Alimentação do Hidrociclone.....	41

6. FILTRAGEM	42
6.1 Processo	42
6.2 Malhas de Controle Típicas	44
6.2.1 Controle do Vácuo	44
6.2.2 Controle de Rotação dos Discos	45
7. SEPARADOR MAGNETICO TIPO WHIMS	45
7.1 Processo	45
7.2 Malhas de Controle Típicas	47
7.2.1 Controle da Densidade de Alimentação do Jones	47
7.2.2 Controle de Pressão da Água de Lavagem	48
7.3 Intertravamentos	49
8. CONCLUSÃO	50
9. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFIA	51

1. INTRODUÇÃO

Uma usina de beneficiamento de minério de ferro possui inúmeras malhas de controle para garantir o automatismo, a repetibilidade e, conseqüentemente, a eficiência do processamento. Uma malha de controle reduz a variabilidade de seu processo, deixando-o mais determinístico, além de reduzir a dependência dos operadores e de seus vícios operacionais. Ainda, liberam esses funcionários para despender sua energia em atividades mais nobres, e não mais em atividades rotineiras e repetitivas.

Para uma planta com produção mediana, de aproximadamente 20 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, possuindo todo o ciclo de cominuição e beneficiamento, podem existir aproximadamente 100 malhas de controle, sendo esse número extremamente variável e dependente da configuração do processo.

O objetivo desse presente trabalho é a discussão de estratégias de controle comumente utilizadas numa planta de beneficiamento de minério de ferro, contemplando desde os processos posteriores à cominuição à filtração, caracterizando, dessa forma, a via úmida de uma planta comumente encontrada.

Uma das formas de se alcançar uma maior eficiência no processo, e sem a necessidade de grandes investimentos de capital, é o emprego adequado de estratégias de controle de processo.

Para evitar generalizações, sempre que necessário serão escolhidos equipamentos específicos desse processo, conforme abaixo:

1. Ciclonagem
2. Separação Magnética a úmido de alta intensidade (WHIMS)
3. Flotação Em coluna
4. Flotação mecânica
5. Filtração vertical a vácuo (disco)
6. Espessamento

Essa configuração é típica de uma usina de beneficiamento, sendo utilizada, como exemplo marcante, dada sua relevância, na unidade produtiva de Cauê, da companhia Vale S.A., em Itabira.

Para esse estudo, será considerado apenas o controle regulatório, sem utilização de sistemas especialistas ou controle avançado. De forma a melhor contextualizar o cenário no qual esse estudo será conduzido, pode-se descrever um sistema de controle conforme itens abaixo:

1. Instrumentação - conforme relatado por Ender (1993), cerca de 30 % das malhas de controle de uma unidade apresentam problemas de instrumentação e de elementos finais de controle. Essa justificativa já seria suficiente para corroborar a necessidade de uma avaliação mais criteriosa de todos os elementos pertencentes a uma malha antes de iniciar os estágios subsequentes. No caso de um ambiente tão agressivo como o encontrado nas usinas de beneficiamento de minério de ferro, onde os instrumentos estão sujeitos à polpa de minério e à poeira condutiva de ferro, essa avaliação se torna imperativa, caso contrário, as etapas subsequentes por si só não seriam capazes de trazer resultados significativos
2. Controle regulatório tradicional – com sua instrumentação adequada, o próximo estágio a ser alcançado é o controle regulatório tradicional, considerando a estratégia de controle a ser adotada (que será o objetivo desse estudo) e a sua sintonia.
3. Como último estágio, pode-se considerar o controle avançado ou a utilização de sistema especialista, mas, para isso, deve-se garantir a funcionalidade dos itens 1 e 2 acima descritos.

Para cada equipamento descrito nesse estudo, será elaborada uma breve descrição do processo, de forma a contextualizar o leitor das estratégias sugeridas. Ainda, sempre que houver alguma restrição ou consideração importante a respeito da instrumentação mais adequada para essas malhas, esse tópico será abordado.

Por último, sempre que houver intertravamentos relevantes para a operação dos equipamentos, esses serão descritos.

2. FLOTAÇÃO

2.1 Processo

Segundo Chaves (2004), flotação é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies presentes. A seletividade desse processo baseia-se na diferença de hidrofobicidade apresentada entre as partículas, característica que pode ser compreendida como a sua “molhabilidade”, a qual pode ser natural ou induzida por reagentes apropriados.

Para o caso de flotação em coluna, a polpa que alimenta a coluna deve ser condicionada de maneira prévia, sendo que esse material alimenta a coluna a aproximadamente dois terços de sua altura. A polpa, ao entrar em contato com o ar ascendente, tem suas partículas hidrofóbicas carregadas para a espuma, formando, dessa forma, o flotado que transborda. Água de lavagem é adicionada no topo da coluna com o objetivo de estabilizar a espuma e substituir a a polpa hidrofílica intersticial na fração flotada (Perseschini, 2004; Oliveira e colaboradores, 2004). O material não flotado (ou afundado) é retirado pelo fundo da coluna.

O sistema da coluna de flotação é comumente dividido em três fases: polpa aerada, interface polpa/espuma e espuma. A região acima da interface é denominada zona de limpeza, enquanto a região entre o ponto de introdução do ar até a interface é denominada zona de coleta ou de recuperação.

2.2 Objetivos de Controle

Apesar da crescente utilização de automação nos processos de flotação, poucas unidades podem ser consideradas totalmente automatizadas, no sentido de

operarem por longos períodos sem auxílio humano, apesar dos instrumentos cada vez mais robustos, da existência de grande número de algoritmos e de controladores.

O maior problema tem sido a estabilização de um processo tão complexo, e então desenvolver modelos que permitiria a definição de pontos de ajuste de variáveis (mais conhecidos pela expressão inglesa: *set points*) e limites para a acomodação de mudanças no tipo do minério, a composição mineral do mesmo, a textura e a contaminação da alimentação, que é muito comum nesse tipo de processo.

Outra limitação significativa é a forte necessidade de uma manutenção adequada dos instrumentos de campo, constantemente sujeitos à intempéries do processo, como polpa, incrustações, corrosão e depósito de poeira do minério.

Atualmente, pode-se dizer que os sistemas de controle de maior sucesso são aqueles em que a intervenção do operador ocorre apenas para ajustes de *set points* e de limites do processo, quando necessários.

Nesse sentido, ainda não se pode confirmar que a utilização de controle avançado reflita num melhor rendimento metalúrgico do que o controle regulatório tradicional, com a interferência de operadores experientes.

Por outro lado, a interferência humana está sujeita à problemas de falta de padronização, trocas de turno, desatenção ou outras interrupções que podem interromper a correta operação da flotação.

O objetivo principal de um sistema de controle para a flotação é a otimização da eficiência metalúrgica, isto é, produzir a melhor curva teor *versus* rendimento e estabilizar o teor no ponto onde ocorre o melhor desempenho econômico do processo, em contrapartida às variações de entrada no circuito. Com controle adequado das variáveis teor e rendimento, garante-se a qualidade e a produtividade da usina, respectivamente. Esse objetivo, entretanto, ainda não foi atingido pelos sistemas de controle atuais (*Wills e Napier-Munn, 2006*), até porque a medição em tempo real desses índices requer um grande esforço de manutenção e calibração de

analisadores em linha (*on-line*), de forma a trazer disponibilidade e precisão aceitáveis.

Caso o circuito de cominuição opere adequadamente, não são esperadas variações significativas na granulometria do minério, assim como na densidade da polpa e na variação da taxa de alimentação. Levando isso em consideração, a função primordial do controle da flotação é controlar a variação da mineralogia e a flotabilidade do minério.

As variáveis manipuladas para atingir esse objetivo são vazão mássica de entrada, adição de ar e de reagentes, nível da polpa e da camada de espuma e pH, o que podemos considerar como objetivos secundários de controle. Essas, inclusive, são malhas as comumente encontradas nos controladores das usinas.

Idealmente, quando os objetivos primários podem ser mensurados, a estratégia de controle baseia-se na alteração dos *set points* das malhas de controle existentes nos controladores, de forma a atingir melhor performance operacional.

Variável importante é a apreensão dinâmica de gás na polpa aerada (*hold up*) é a fração volumétrica da fase gasosa na polpa. Outra variável de importância é o chamado viés (*bias*), o qual se refere à fração de água de lavagem que, atravessando a zona de limpeza, se reporta ao fluxo do não flotado.

Por outro lado, caso o objetivo primário não possa ser medido (o que é comumente encontrado) e os objetivos secundários estejam sob controle, o controle em cascata do *hold up* e do viés se tornam objetivo intermediário, assim como as características da espuma podem também se tornar (brilho cor, velocidade, etc.). Para esses casos, o maior problema é estabelecer uma relação entre esses controles intermediários com a recuperação e o teor do concentrado.

Os objetivos secundários de controle já são comumente mensurados, com, pelo menos, a medição *on-line* da água de lavagem, vazão de ar e camada de espuma. Por outro lado, as variáveis comumente manipuladas são rejeito, ar e água de

lavagem. Em alguns circuitos, existe também o controle de pH e de dosagem de reagentes químicos.

Esse controle é conhecido como estratégia estabilizadora. A falta de instrumentos precisos, dinâmica não linear e alta interação entre variáveis são os principais problemas identificados por essa estratégia, sendo que essas características vêm trazendo alta taxa de variabilidade nas taxas de concentrado e no teor do minério em diversos processos de flotação no mundo (Bergh e Yianatos,2003).

Outras contribuições para essa variabilidade advêm do caráter oscilatório da alimentação da polpa na coluna (refletindo a condição dos processos anteriores), problemas pontuais na alimentação de água a ar, problemas na instrumentação oriundas da calibração, manutenção e falhas e, principalmente, a falta de uma ação coordenada entre os recursos, como nível da camada de polpa, taxa de alimentação de ar e de água

Levando em consideração essa variabilidade do processo, Perseschini (2004) considera como principal objetivo de controle de uma coluna de flotação a estabilidade do processo, viabilizando, posteriormente, o segundo objetivo de controle, que seria o alcance dos valores de referência para a recuperação e o teor do mineral de interesse no concentrado e, finalmente, maximizar o desempenho econômico do processo.

Essa ordem de predeceção se justifica pela clara lógica de que é inviável o alcance do máximo desempenho econômico sem antes se pensar na estabilidade do processo

2.3 Malhas de Controle Típicas

Levando em consideração os aspectos citados no item 2.2 - Objetivos de Controle, as malhas de controle típicas de uma coluna de flotação reversa de minério de ferro são:

- Controle do nível de polpa;

- Adição de água de lavagem;
- Adição de ar;
- Controle de pH;
- Adição de amina;
- Adição de amido;

2.3.1 Controle do Nível de Polpa

O controle do nível de polpa geralmente é conseguido através do controle da vazão do afundado. Esse nível é determinante para diferenciar a zona da coleta (polpa) e da zona da limpeza (polpa). O nível baixo dessa interface indica uma baixa recuperação, por outro lado, diminuindo a camada de espuma significa diminuir a limpeza do material flotado, deteriorando seu teor. Ainda, um nível de polpa constante é importante para assegurarmos a estabilidade e a eficiência do processo.

A medição do nível de polpa pode ser realizada a partir de um medidor ultrassônico, já que essa onda reflete no meio mais denso (polpa) e retorna para o elemento de medição. Outra possibilidade é a medição do deslocamento de um dispositivo com densidade intermediária, entre a da polpa e a da espuma.

Estudos conduzidos em plantas pilotos têm indicado a validade de se utilizar a condutividade elétrica como forma de se identificar o ponto de interface polpa/espuma, já que a condutividade seria alterada de maneira brusca na interface, devido à alteração do valor de *hold up* de ar.

Apesar da utilização de uma série de eletrodos ao longo da coluna causar imprecisão devido ao caráter discreto da medição, pode-se interpolar os pontos a partir da utilização, por exemplo, de rede neural. Mesmo essa abordagem não se mostrou satisfatória devido à dificuldade em se treinar a rede, além de ser necessário um treinamento específico para cada caso (Perseschini, 2004). Por esse motivo, ainda não foi reportada essa aplicação com caráter industrial.

Uma forma de se inferir essa variável pode ser utilizando-se de dois medidores de pressão instalados na coluna, já que a altura h dessa camada pode ser relacionada pela equação abaixo (Perseschini, 2004):

Equação 1
$$h = \frac{P_1 \cdot H_2 - P_2 \cdot H_1}{(P_1 - P_2) + \rho_f z \cdot g (H_1 - H_2)}$$

As variáveis dessa equação podem ser visualizadas na **Figura 2-1**.

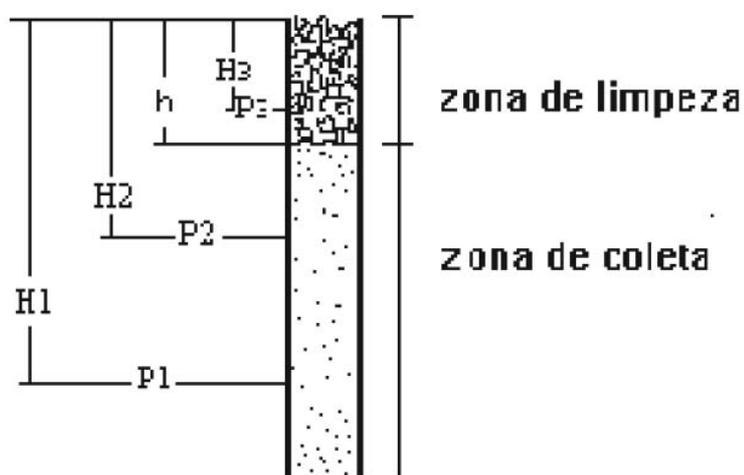


Figura 2-1: Sistema Para Medição da Altura da Camada de Espuma

Fonte: Perseschini, 2004.

Como pode ser observado, a equação mencionada elimina a necessidade de um medidor na zona de limpeza; entretanto, deve-se saber a densidade média dessa zona.

Podemos então considerar essa malha conforme parâmetros ilustrados na Tabela 1 - Malha de Controle d Tabela 1:

Tabela 1 - Malha de Controle do Nível da Polpa

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejável para o nível da polpa, inserido pelo operador ou determinado automaticamente por um sistema de controle avançado, respondendo à alterações de teor, recuperação, condição da polpa ou outro critério
PV	Nível h, inferido a partir da equação 1, da interface polpa/espuma
MV	Válvula de controle da saída do afundado

Nessa e nas tabelas seguintes sobre malhas de controle, SP significa *set point*, PV, variável de processo; e MV, variável manipulada.

2.3.2 Controle de Adição de Água de Lavagem

A malha de controle de adição de água de lavagem pode ser considerada conforme ilustrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Malha de Controle de Adição de Água de Lavagem

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejável para adição de água de lavagem, geralmente fixo
PV	Vazão da água de lavagem
MV	Válvula de controle da adição da água de lavagem

Para a medição de água de lavagem, é comumente utilizado um medidor eletromagnético de vazão.

2.3.3 Controle de Adição de Ar

A adição de ar é variável de grande importância num processo de flotação, já que ela impacta diretamente no *hold up* de ar e, conseqüentemente, na probabilidade de recuperação do material de interesse ou, no caso do minério de ferro, no teor (flotação reversa).

Uma malha de controle comumente utilizada para a adição de ar é baseada nas variáveis encontradas na Tabela 3:

Tabela 3 - Malha de Controle de Adição de Ar - Alternativa 1

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado de vazão de ar, calculado com base na massa de alimentação nova de polpa
PV	Vazão de ar
MV	Válvula de controle da adição de ar

O *set point*, dessa forma, seria variável e calculado com base na massa de alimentação nova de polpa. Para isso, é necessária a utilização de dois instrumentos na linha de adição de polpa, um densímetro, normalmente radioativo, e um medidor de vazão volumétrico. Multiplicando-se a vazão pela densidade da polpa, tem-se a massa de alimentação nova, utilizada como base para o *set point* de vazão de ar.

Outra forma de se fechar essa malha de controle é utilizar o *hold up* de ar como variável base para o cálculo do *set point* da vazão de ar (Tabela 4). O *hold up* é definido como a fração volumétrica de ar contida em uma determinada zona da

coluna. Esse parâmetro depende da vazão de ar, do tamanho das bolhas, da densidade de polpa, do carregamento de sólido nas bolhas e da velocidade descendente de polpa (Luz, 2002).

Tabela 4 - Malha de Controle de Adição de Ar - Alternativa 2

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado de vazão de ar, calculado com base no <i>hold up</i> de ar na coluna (equação 2)
PV	Vazão de ar
MV	Válvula de controle da adição de ar

O *hold up* de Ar pode ser inferido a partir de dois medidores de pressão instalados na coluna, já que a altura h dessa camada pode ser relacionada conforme equação 2 (Perseschini, 2004).

Equação 2

$$\text{Hold up de Ar} = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{Sl} \cdot g \cdot \Delta H}$$

Onde as variáveis estejam expressas em sistema coerente de unidades; sendo que ρ_{Sl} é a massa específica da polpa, ΔH é a distância entre as medidas de pressão e ΔP a diferença de pressão, conforme **Figura 2-2**.

Para essa medição, recomenda-se a medição de pressão em um ponto próximo à base da coluna (2 a 3 metros), sendo que o primeiro medidor deverá ficar a uma distância mínima dos aspersores, de forma a evitar distúrbios pela injeção de ar.

Com essa configuração, a densidade da polpa pode ser aproximada pela densidade medida no material não flotado (Perseschini, 2004), devido à proximidade.

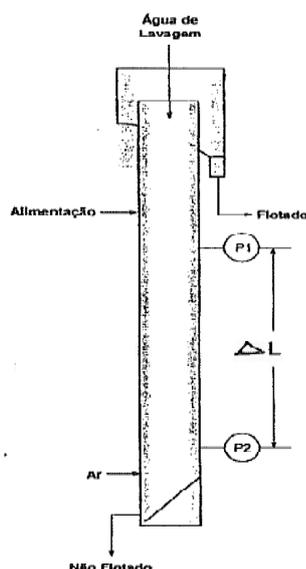


Figura 2-2: Medição de *Hold up* de Ar

Fonte: Bergh e Yianatos, 2003.

Uma característica importante para a variável *hold up* é o caráter linear que ela apresenta com o aumento da vazão do ar. Essa característica linear, entretanto, é perdida quando a vazão ultrapassa um determinado ponto. Durante o período linear, conhecido como regime de borbulhamento uniforme, encontra-se a zona ideal de operação, já que a recuperação aumenta com o aumento da vazão de ar. Por outro lado, quando se ultrapassa esse ponto, o que é indesejável operacionalmente, classifica-se o estado como regime de fluxo turbulento.

A partir do exposto anteriormente, verifica-se a importância da variável *hold up* de ar que, mesmo não sendo utilizada para o fechamento da malha, conforme ilustrado na primeira alternativa, apresenta vantagens em seu monitoramento.

Para a medição de vazão de ar, os medidores de placa de orifício ou de vazão mássica são comumente utilizados.

2.3.4 Controle de pH

Outra malha comumente empregada na flotação é controle de pH. Essa malha possui um complicador adicional devido ao alto tempo morto do processo, entre a adição da soda e a mudança no pH da polpa. Uma forma de coibir esse problema é aproximar ao máximo a distância entre essa adição e o peagômetro.

Essa malha de controle é geralmente empregada independentemente das demais, apesar do *set point* poder ser alterado conforme características do processo.

Tabela 5 - Malha de Controle de pH

Elemento da Malha	Descrição
SP	pH desejado, inserido pelo operador
PV	pH da polpa
MV	Válvula de controle manipulando a adição de soda cáustica

2.3.5 Adição de Amido

A adição de amido ocorre ainda na etapa de preparação, em tanques dedicados à essa finalidade, de maneira prévia à flotação propriamente dita.

A adição do coletor é de grande importância para a recuperação do mineral de interesse, já que, tipicamente, sua recuperação aumenta até determinado ponto, a partir do qual o aumento cessa, podendo até mesmo diminuir.

O principal objetivo do controle, dessa forma, é permitir a adição de amido no limite desse ponto, o que não é facilmente atingido, devido à dificuldade em identificá-lo, seja pelas mudanças nas características do minério ou pela interação com outros reagentes (*Wills e Napier-Munn, 2006*).

Existe a possibilidade de se empregar controle feed-forward para essa malha, considerando a massa do mineral de interesse (levando em consideração o seu teor) na alimentação como sua PV, atuando na adição do coletor (MV). A maior dificuldade encontrada nessa estratégia é a impossibilidade de se garantir um modelo correto entre as variáveis, já que, conforme mencionado, a adição ótima do amido não é facilmente correlacionada com a massa desse mineral de interesse na alimentação.

Comumente, utiliza-se controle *feed-forward* semi-automático, permitindo que o operador altere o *set point* para adequar a malha às novas características do minério alimentado. Dentro dessa nova faixa de operação, permite-se que haja uma pequena variação automática do controlador. Como exemplo, pode-se entender essa filosofia conforme equação abaixo (Wills e Napier-Munn, 2006), onde o operador possui a liberdade de alterar o parâmetro A (acomodando o processo conforme minério alimentado), permitindo que o controlador opere numa nova faixa de operação (alterando o parâmetro B).

$$\text{Alimentação do Coletor} = A + (B * \text{Teor do Minério de Interesse na Alimentação})$$

Na prática, dificilmente o teor da polpa de alimentação é medido em tempo real, o que impossibilita o controle conforme mencionado. Comumente, utiliza-se como variável medida a vazão mássica nova no circuito de flotação. Como o amido é sólido, é prática comum armazená-lo em um silo, sendo sua vazão de saída manipulada por uma balança dosadora com base nessa vazão.

Outra forma de se controlar a adição do coletor é fechando a malha utilizando-se a estratégia de controle de retroalimentação, reaferrência ou *feedback*, desde que exista instrumentação adequada de medição em tempo real do teor do concentrado da coluna de flotação, além do teor da alimentação.

Tabela 6 - Malha de Controle de Adição de Amido – Alternativa 1

Elemento da Malha	Descrição
SP	Calculado com base na vazão mássica nova do circuito de flotação
PV	Vazão de amido
MV	Atuação da balança dosadora de amido

Com base nessas informações, pode-se calcular a recuperação do minério no processo. Em alguns processos (*Wills e Napier-Munn, 2006*), foram identificadas relações lineares entre a recuperação e a adição do coletor.

Para essa estratégia, tem-se a seguinte configuração:

Tabela 7 - Malha de Controle de Adição de Amido – Alternativa 2

Elemento da Malha	Descrição
SP	Calculado com base na recuperação do processo, sendo que a recuperação também deverá ser calculada com base no teor do concentrado e da alimentação.
PV	Vazão de amido
MV	Atuação da balança dosadora de amido

Para essa estratégia, os mesmos problemas já citados também podem ser relacionados, a interferência da alteração do minério e, especificamente para esse caso, existe uma grande dependência da instrumentação, já que todo o *set point* é calculado com base nas informações por ele disponibilizadas (teor do concentrado e da alimentação).

2.3.6 Adição de Amina

A adição de amina, assim como a alternativa 1 da malha de controle da adição de amido, pode ser calculada com base na vazão mássica nova do circuito de flotação, conforme tabela Tabela 8:

Tabela 8 - Malha de Controle de Adição de Amina

Elemento da Malha	Descrição
SP	Calculado com base na vazão mássica nova do circuito de flotação
PV	Vazão de amina
MV	Atuação na válvula de controle da saída do tanque de preparação de amina

2.4 Tendências

Outra possível instrumentação que pode ser encontrada em colunas de flotação é a utilização de equipamentos de fluorescência de raios X para a medição dos teores no concentrado, na alimentação e no rejeito. Com a grande evolução no automatismo dos sistemas de suporte dessas máquinas, já é possível encontrar no mercado sistemas com amostragem automática, transporte da polpa, análise,

calibração e limpeza da célula. Apesar disso, a disponibilidade desses sistemas em uma usina é fortemente dependente de uma manutenção adequada (Bergh e Yianatos, 2003).

Essas dificuldades, aliadas com o alto valor de investimento e de manutenção, tem direcionado o mercado a utilização de um sistema que avalie o desempenho da flotação a partir da avaliação da espuma. Com essa nova filosofia, parâmetros como brilho, forma, velocidade e cor podem ser visualizados por uma câmera e estimadas em tempo real (Bergh e Yianatos, 2003).

A espuma é fotografada em intervalos regulares de tempo (ou filmada), sendo que essa imagem é comparada com padrões. Um programa, elaborado com conceito de lógica nebulosa ou difusa (*fuzzy logics*), compara essa imagem com modelos alimentados previamente e, com base nesse comparativo, traça a estratégia de controle, atuando nas variáveis pH, vazão de ar injetada e nível da célula, além da dosagem dos reagentes.

3. CÉLULAS MECÂNICAS CONVENCIONAIS

Devido à similaridade entre células mecânicas e colunas de flotação, as malhas de controle citadas no item anterior não serão descritas novamente. O objetivo desse presente tópico será apenas ilustrar as principais divergências encontradas entre esses dois processos, principalmente no que tange o controle e a instrumentação.

As colunas de flotação diferem significativamente das células mecânicas convencionais de flotação, tanto no aspecto construtivo quanto no aspecto operacional.

As principais diferenças observadas entre esses dois circuitos podem ser relacionadas conforme abaixo:

1. Geometria:
 - a. As colunas de flotação apresentam maior relação altura/ diâmetro frente às células mecânicas convencionais;

2. Água de lavagem:
 - a. As colunas de flotação apresentam a adição de água de lavagem com o intuito de retirar as partículas contaminantes carregadas hidraulicamente, além de ajudar na estabilização da espuma;
3. Ausência de agitação mecânica:
 - a. Diferentemente das células, onde a agitação mecânica é necessária para promover a colisão entre partículas e bolhas, a coluna de flotação não possui sistemas forçados de agitação;
4. Sistema de geração de bolhas:
 - a. O sistema de geração de bolhas em uma célula, que pode ser impulsionado pela pressão relativa negativa criada pelo movimento do rotor, é diferente do sistema utilizado nas colunas, onde o ar é injetado na base do equipamento.

Esses quatro fatores somados geram, como consequência, as principais diferenças práticas encontradas entre colunas e células de flotação, dentre as quais, podemos destacar:

1. Recuperação;
2. Teor;
3. Escalonamento (*scale up*);
4. Custos associados;
5. Área instalada;
6. Controle e instrumentação;

A respeito do item 6 (controle e instrumentação), que é o objeto desse estudo, os seguintes controles, já citados como viáveis para as células de flotação, também podem ser empregados numa célula mecânica convencional, sendo eles:

- Controle de pH, de adição de amina e de amido, de maneira prévia à flotação propriamente dita;
- Controle do nível de polpa na célula e na coluna, a partir da abertura da válvula do material não flotado.

Por outro lado, a coluna de flotação permite o controle de outras variáveis que a célula mecânica convencional não permite, ou por questões operacionais (como a vazão de ar), ou mesmo pela inexistência dessa variável (vazão de água de lavagem). Os itens abaixo descrevem as malhas de controle que não podem ser empregadas numa célula mecânica convencional:

Vazão de Ar

Uma grande diferença encontrada entre os dois processos é a possibilidade de se controlar a vazão de ar em uma coluna de flotação. Esse controle, por sua vez, não é trivial em células mecânicas auto aeradas, quando a rotação do rotor gera pressão negativa para aspirar o ar. O controle dessa variável é extremamente simples em colunas, já que o atuador consiste em uma válvula de controle, variando conforme necessidade.

Água de Lavagem

Uma dos principais avanços da coluna de flotação foi a introdução da água de lavagem, que possui três principais objetivos:

1. Substituir a água de alimentação na fração flotada, minimizando o arraste hidráulico de partículas hidrofílicas, o que aumenta o teor do material concentrado;
2. Aumentar a altura e a estabilidade da camada de espuma;
3. Reduzir a dispersão das bolhas;

Finalmente, ainda no que tange o controle de processos, a coluna de flotação é mais eficiente do que o controle em uma célula de flotação, já que a medida das variáveis de interesse ocorre em um número menor de pontos do circuito.

4. ESPESSAMENTO

4.1 Processo

Espessadores são equipamentos destinados a adensar o material alimentado, além de permitir a separação sólido-líquido. Esse material, por sua vez, pode ter uma grande variação de densidade, podendo ser diluído (entre 5 e 10% de sólidos) ou mais adensados, sendo que o espessador os desagua entre 65 e 75% de sólidos. Esse valor depende principalmente da capacidade da bomba do *underflow* de manusear o material adensado, e não da capacidade do espessador.

O material adensado pode ser utilizado em vários tipos de processos subsequentes, como filtragem, bombeamento e condicionamento. Outra função importante do espessador é maximizar recuperação de água, recirculando-a para o processo a partir do adensamento do rejeito.

Os espessadores são equipamentos cilíndricos, com diâmetros muito maiores do que sua altura (o diâmetro pode variar entre 2 e 200 metros, sendo sua altura entre 1 e 7 m), feitos geralmente de aço ou concreto armado, sendo o aço mais econômico para espessadores cujo diâmetro não ultrapasse 25 metros.

A sua alimentação ocorre pelo centro, através de um mecanismo que evita ao máximo a perturbação, sendo que as partículas sólidas se sedimentam e são retiradas pelo fundo, enquanto o líquido sobrenadante é retirado por transbordamento em calhas na parte superior.

Um ou mais rastelo (*rake*), gira lentamente no fundo do tanque, tendo como função direcionar o material afundado para o centro, de onde ele é retirado pelas bombas de espessado ou *underflow*. Nesse braço ficam instaladas laminas que auxiliam nesse processo de extração.

Além dessa função, ele possui outras finalidades (Chaves, 2004):

1. Retirar as bolhas presas no espessado;
2. Aumentar a densidade do espessado;

3. Arrumar as partículas sólidas, uma sobre a outra, de forma a minimizar o volume ocupado;
4. Manter os sólidos depositados em suspensão, de forma a evitar o aterramento do espessador;

Usualmente, a velocidade do *rake* é de 8 metros por minuto, o que corresponde a 10 voltas por hora num espessador de 15 metros de diâmetro. Por esse motivo, o consumo energético desses equipamentos é muito baixo. Mesmo para um diâmetro de 60 metros, o motor poderia ser de aproximadamente 10 KW (*Wills e Napier-Munn, 2006*).

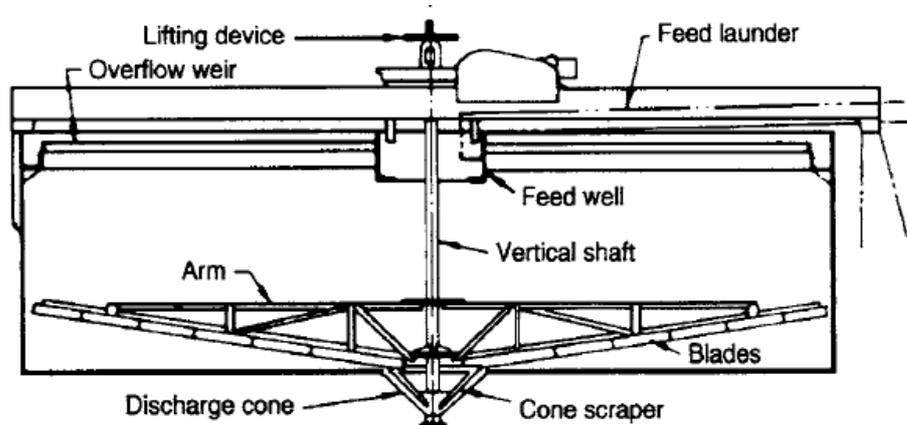


Figura 4-1: Esquema Típico de Um Espessador

Fonte: *Wills e Napier-Munn, 2006*.

A figura Figura 4-1 ilustra um esquema típico de um espessador. A partir dela, pode-se verificar que o fundo desse equipamento não é necessariamente inclinado, como intuitivamente poderia se pensar. Por outro lado, o formato inclinado do *rake* se traduz numa aglomeração dos materiais adensados nessa mesma configuração.

4.2 Malhas de Controle Típicas

4.2.1 Velocidade da Bomba

Para o funcionamento adequado do espessamento, é de suma importância a possibilidade de se controlar a velocidade da bomba do *underflow*, aumentando sua rotação conforme densidade do material adensado. A bomba utilizada para esse propósito é frequentemente a do tipo diafragma, já que esse tipo de bomba possui boa aplicação para líquidos densos e viscosos.

Essa possibilidade, além de ser benéfica para o processo, diminui o risco do soterramento dos rastelos, dito “aterramento” do espessador, já que o aumento da velocidade da bomba reduz a densidade média do material remanescente no equipamento, devido à saída do material adensado. Vale ressaltar que esse controle é um dos poucos recursos disponíveis para o engenheiro de processo para manipular o espessador (além do controle de torque e controle da dosagem de agregantes).

O principal objetivo desse controle é manter a densidade do material adensado constante. Um inversor de frequência é necessário para viabilizar o controle da velocidade da bomba. Dessa forma, ao se dizer aumentar a velocidade da bomba, significa, na verdade, alterar a corrente desse inversor, que age como o atuador do processo. Por questões de praticidade, essa interface será omitida.

O densímetro utilizado nesse processo, que geralmente é o mesmo utilizado para as demais etapas de um processo de beneficiamento mineral; podendo ser do tipo radioativo.

Tabela 9 - Malha de Controle da Velocidade da Bomba

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado para a massa específica da polpa adensada, inserido pelo operador (g/cm ³);
PV	Massa específica do <i>underflow</i> (kg/m ³);
MV	Velocidade da Bomba (

4.2.2 Adição de Coagulante

O coagulante força a adesão de partículas muito finas. Apesar de todas as partículas exercerem forças mútuas, chamada de Van Der Waals, elas apenas surtem efeito quando muito próximas uma das outras. Ainda, existe um balanço entre essas forças e forças coulombianas de repulsão.

Em soluções aquosas com prevalência de silicatos em suspensão e onde o pH é acima de 4, geralmente a carga predominante é negativa. Por outro lado, soluções muito ácidas possuem cargas predominantemente positivas.

O papel do coagulante é exatamente evitar as repulsões existentes entre as partículas, o que indesejável, já que, além de retardar a adesão, ela retarda a sedimentação. Para isso, ele precisa ter carga oposta à predominante, de forma a causar neutralização e permitir a adesão causada por forças moleculares.

A adição do coagulante é vantajosa para possibilitar a ação dos flocculantes.

Para minérios de ferro, geralmente se utiliza algum ácido como coagulante (por vezes empregando-se ácido carbônico oriundo da injeção de dióxido de carbono em água), sendo sua adição controlada a partir de uma malha fechada, utilizando-se o peagômetro como medidor, conforme abaixo:

Tabela 10 - Malha de Controle de Adição de Coagulante

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado do pH, inserido pelo operador
PV	Adição de ácido ou CO ₂
MV	Atuação na válvula de controle da adição de ácido

4.2.3 Adição de Floculante

A adição de floculante é comumente necessária para formar aglomerados muito maiores do que aqueles formados pelos coagulantes. Seu princípio se baseia na utilização de reagentes que funcionam como “pontes” interligando partículas suspensas.

A adição de floculante pode ser calculada com base na massa do material adensado e na interface água-lama do espessador. Dessa forma, tem-se uma malha de controle em cascata, onde o *set point* da vazão de floculante seria variável e calculado com base nos dois componentes citados. Para isso, é necessária a utilização de dois instrumentos na linha do material adensado, um densímetro, normalmente radioativo, e um medidor de vazão volumétrico. Multiplicando-se a vazão pela massa específica da polpa, tem-se a vazão mássica do material adensado, utilizada como base para o *set point* da adição de floculante.

Tabela 11 – Malha de Controle de Adição de Floculante

Elemento da Malha	Descrição
SP	Calculado com base na interface água-lama e na vazão mássica do adensado
PV	Adição de floculante
MV	Válvula de Controle da Adição de Floculante

A utilização da informação da interface entre a zona de sedimentação e a zona de água limpa é de grande importância para a obtenção de densidade de polpa adequada no *underflow*, além de garantir a desejada qualidade da água recuperada.

Caso a interface esteja alta, a vazão de floculante deve ser aumentada, aumentando a sedimentação de sólidos. Caso isso não seja feito, a probabilidade da água recuperada estar contaminada com sólidos é muito grande.

Por outro lado, se essa interface estiver abaixo do *set point* especificado, significa que o gasto de floculante está maior do que o necessário, podendo diminuir sua vazão, economizando um importante e caro insumo da usina.

Mesmo não se utilizando a interface água-lama para o fechamento da malha de controle acima descrita, o monitoramento dessa variável é importante, já que impacta diretamente tanto na densidade do *underflow* quanto na clarificação da água do *overflow*.

O princípio de medição dessa variável pode ser ultrassônico, da mesma forma como se utiliza para flotação.

4.3 Intertravamentos

Mesmo não se caracterizando uma malha de controle, os espessadores possuem um sistema de proteção que, devido a sua importância, vale ser ressaltado.

O *rake*, conforme informado no item 4, é de suma importância para o bom funcionamento do espessador. Para evitar os problemas de emperramento, faz-se necessária a utilização de um torquímetro no corpo da haste, possibilitando a leitura constante do esforço a que ela está sendo submetida.

No caso de um esforço alto, geralmente causado por um emperramento no momento em que ele encontra objetos pesados como ferramentas, ou mesmo polpa muito densa, o torquímetro informa essa deformação ao sistema de controle que, por sua vez, eleva o *rake* até uma posição que permita a continuidade do movimento, fazendo com que o valor do torque retorne para patamares aceitáveis e preestabelecidos. Essa informação é importante de ser monitorada, de forma a antever um princípio de aterramento.

Caso o *rake* esteja na sua altura máxima e o valor do torque continue em patamares não aceitáveis, o motor para, evitando a sobrecarga do mesmo por corrente alta.

Para isso, uma outra variável de grande importância para a operação do espessador é o nível do *rake*, sendo que essa medição depende principalmente do mecanismo de elevação do braço. Medidor tipo *encoders* e potenciômetros podem ser utilizados, por exemplo.

Por outro lado, o princípio de medição de torque mais comumente utilizado é a célula de carga, podendo também ser utilizado o valor da potência do motor.

5. HIDROCICLONES

5.1 Processo

Os hidrociclones são equipamentos de classificação com operação contínua, que utilizam a força centrífuga como principal fator para a separação. Eles são um dos

principais equipamentos encontrados em uma unidade de beneficiamento. Além da separação, é também utilizado para operações de desaguamento ou espessamento. Sua principal vantagem é a alta capacidade de processamento com eficiência satisfatória. Ainda, podem ser utilizados numa ampla faixa de granulometria (5 a 500 micrômetros).

Os hidrociclones possuem uma aparência cônica, aberto no seu ápex (*underflow*) e unido a uma parte cilíndrica, onde ocorre a alimentação tangencial da polpa do minério. Por essa parte superior do equipamento um cilindro concêntrico, dito captor de vórtex ou *vortex finder* (Luz, 2010), adentra ao seu interior, evitando que ocorra curto-circuito (figura **Figura 5-1**).

A alimentação é realizada tangencialmente sob alta pressão, na sua parte superior, forçando o movimento em espiral da polpa. Esse movimento causa uma área de baixa pressão no eixo axial, o que causa um núcleo de ar, que é desprendido da solução devido à pressão baixa.

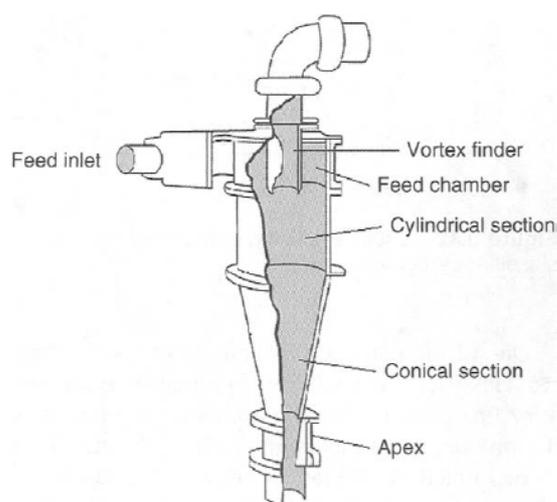


Figura 5-1: Hidrociclones

Fonte: *Wills e Napier-Munn, 2006.*

O princípio de separação desses equipamentos pode ser explicado a partir de das duas principais forças que regem os movimentos das partículas no seu interior:

1. A força centrífuga, que força as partículas a se moverem em direção à borda dos hidrociclones.
2. A força de carreamento, que força as partículas a se moverem para o interior dos hidrociclones.

As partículas mais rápidas, que estão mais sujeitas à força centrífuga, são direcionadas para a parede dos hidrociclones, perdendo velocidade devido ao contato com o equipamento e descendendo para a saída do *underflow*. Por outro lado, devido à força de carreamento, as partículas mais lentas são direcionadas para o centro, na zona de baixa pressão, e saem pelo *overflow*.

Como existe uma zona de material ascendente e uma zona de material descendente, naturalmente existirá uma região no interior do hidrociclone cuja velocidade vertical será nula. Para os materiais situados nessa zona, a probabilidade dele sair pelo *underflow* é a mesma dele sair pelo *overflow*.

A operação dos hidrociclones é extremamente dependente de suas variáveis operacionais. Por esse motivo, é interessante evitar variações no fluxo da polpa alimentada. Uma variável de grande interesse para monitoramento é a pressão nos hidrociclones, já que ela indica esse fluxo de polpa, conforme equação abaixo:

A vazão volumétrica de polpa na alimentação de um hidrociclone típico também pode ser estimada (em m³/s), com boa aproximação, pela equação obtida por Luz (2010):

Equação 3

$$Q_{Va} = 1,2563 \times d_i^{1,88} \times \left(\frac{d_o}{d_c} \right) \times \sqrt{\frac{p}{\rho_{SUS}}}$$

Ou:

Equação 4

$$Q_{Va} = 0,01016 \times d_c^{1,88} \times \sqrt{\frac{p}{\rho_{SUS}}}$$

Onde:

d_c – diâmetro efetivo do hidrociclone [m];

d_i – diâmetro equivalente de injeção [m];

d_o – diâmetro efetivo do captor do vórtex (*overflow*) [m];

p – pressão de injeção [Pa];

ρ_a – massa específica da polpa na alimentação [kg/m^3].

Segundo Luz (2010), as equações acima dão resultados compatíveis com a equivalente dada por Razumov e colaboradores (1985), resultando maior aderência ainda (discrepância máxima de 1 %) à equação de estimação da vazão do clássico modelo de Plitt (King, 2001), consideradas as relações dimensionais típicas adotadas por aquele autor, como, por exemplo, diâmetro do ciclone aproximadamente cinco vezes o diâmetro de injeção

Dessa forma, a partir da perda de pressão pode-se prever a bomba necessária para uma determinada capacidade do ciclone. Por outro lado, tendo a instalação concluída (bombas), pode-se estimar o diâmetro do hidrociclone necessário (*Wills e Napier-Munn, 2006*).

Como o aumento de pressão (ou vazão) aumenta a força centrífuga, mais partículas finas são carregadas para o *underflow*, o que reduz o diâmetro de equipartição (d_{50}), como pode ser verificado na Figura **Figura 5-2**.

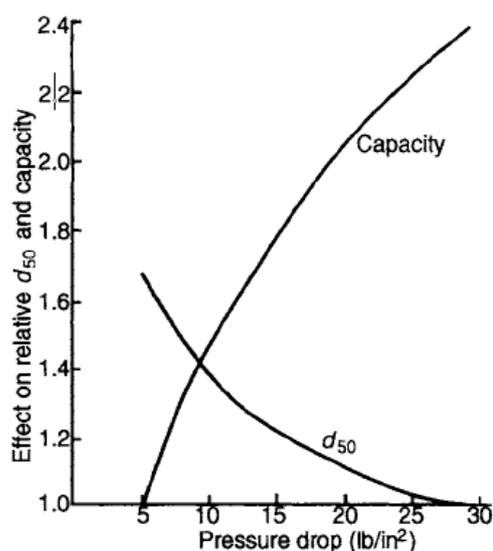


Figura 5-2: Efeito da Pressão no d_{50}

Fonte: *Wills e Napier-Munn, 2006.*

Os manômetros que realizam esse monitoramento geralmente são do tipo diafragma, instalados na entrada do ciclone, suficientemente longe da válvula para não permitir que o estrangulamento do fluxo afete a sua medição (Chaves, 2002).

Outra variável de grande interesse nesse processo é a densidade de alimentação da polpa, cuja principal interferência no processo é o aumento do ponto de corte, devido o aumento da resistência para o movimento rotacional imposto pelo ciclone, o que reduz a queda de pressão. Ou seja, mais partículas grossas são carregadas para o *overflow*, por não terem sofrido a força centrífuga originada por esse movimento rotacional.

Por esse motivo, a separação de minério mais fino só é possível para densidades menores, com poucos sólidos. Tipicamente, a porcentagem de sólidos na alimentação não ultrapassa 30 %. Por outro lado, para circuitos fechados de cominuição onde materiais mais grossos são processados, essa porcentagem pode chegar a 60 % em massa. A figura **Figura 5-3** ilustra esse feito.

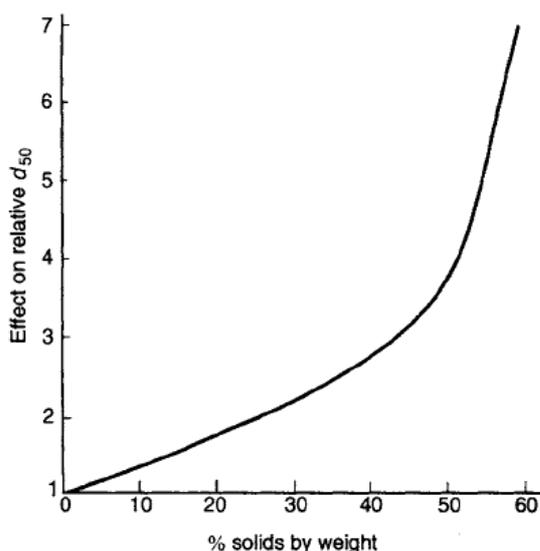


Figura 5-3: Efeito da % de Sólidos no d_{50}

Fonte: *Wills e Napier-Munn, 2006.*

Na prática, o d_{50} de muitos ciclones é configurado em seu projeto, a partir de variáveis como abertura do ápex. Ainda, essas variáveis geralmente são facilmente manipuladas mesmo durante o ciclo operacional da usina, podendo, inclusive ocorrer a regulação automática a partir de um acionamento pneumático (principalmente quando se utiliza o ciclone para a deslamagem, quando a regulação do apex deve ser mais justa).

5.2 Malhas de Controle Típicas

5.2.1 Controle de Pressão nos Hidrociclones

Conforme descrito anteriormente, a pressão é uma variável de grande importância para a operação dos hidrociclones, sendo crucial para a determinação do ponto de corte dos mesmos, conforme ilustrado na Figura **Figura 5-2**.

Uma forma de se controlar essa pressão pode ser alcançada a partir da manipulação de válvulas guilhotinas, na entrada de cada ciclone, no momento em que houver alteração na pressão de entrada da sua bateria de ciclones correspondente. Dessa

forma, o fechamento de algumas dessas válvulas aumenta a pressão geral da bateria, desde que se mantenha a mesma vazão de polpa. Por outro lado, em caso de aumento de pressão, pode-se abri-las novamente.

Tabela 12 - Malha de Controle de Pressão nos Hidrociclones – Alternativa 1

Elemento da Malha	Descrição
SP	Pressão desejável na bateria de hidrociclone, inserida pelo operador
PV	Pressão da bateria de hidrociclone
MV	Válvula guilhotina individuais, em cada hidrociclone

Para esse caso, deve-se considerar o acionamento apenas a partir de desvios maiores do que faixas preestabelecidas do *set point*, evitando que ocorra acionamento constante dessas válvulas, já que essa variável manipulada interfere de forma descontínua no sistema.

Outra forma de se controlar a pressão nos hidrociclones pode ser realizada a partir do controle da velocidade de bombeamento. Para isso, é necessário que se tenha um inversor de frequência controlando a velocidade do motor da bomba. Essa velocidade, por sua vez, pode ser controlada a partir da pressão desejável nos ciclones, conforme Tabela 13.

Essa solução é interessante para mitigar o detrimento do bombeamento, que é natural em função do constante desgaste do rotor.

Tabela 13 - Malha de Controle de Pressão nos Hidrociclones – Alternativa 2

Elemento da Malha	Descrição
SP	Pressão desejada na bateria de hidrociclone, normalmente fixa e inserida pelo operador
PV	Pressão da bateria de hidrociclone
MV	Inversor de frequência, atuando na velocidade do motor para bombeamento da polpa

5.2.2 Controle da Densidade de Alimentação do Hidrociclone

Conforme descrito no item 5.1, a densidade da polpa de alimentação é uma variável operacional importante para se controlar nos ciclones, tendo em vista que esse parâmetro impacta diretamente na eficiência do processo.

O *set point* dessa malha geralmente é inserido pelo operador, com base em sua experiência do processo.

Tabela 14 - Malha de Controle de Densidade da Alimentação dos Hidrociclones

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado para a densidade de alimentação dos hidrociclones, normalmente fixo e inserido pelo operador
PV	Densidade da polpa
MV	Válvula de adição de água no sump

Esse controle é realizado num sump de maneira prévia à adição da polpa nos hidrociclones.

6. FILTRAGEM

6.1 Processo

A filtragem é uma operação unitária, utilizada para a separação das partículas sólidas contidas numa suspensão líquida. Seu princípio de funcionamento baseia-se na passagem desse líquido (em geral água) através de meio poroso, geralmente uma tela, onde o sólido fica retido, permitindo a passagem do líquido.

A diferença de pressão entre os lados do meio filtrante pode ser obtida por ação da gravidade, por pressurização a montante (lado da torta) e por evacuação a jusante do meio filtrante (lado do filtrado). No beneficiamento de minérios o mais comum é a filtragem a vácuo, em especial empregando-se filtros de discos para polpas finas.

A operação da filtragem geralmente é cíclica, constituindo-se das seguintes fases, para a filtragem a vácuo em filtros de discos:

1. Formação da torta

Para os discos verticais essa formação ocorre de maneira forçada, a partir do vácuo criado no interior do disco;

2. Desaguamento

Consiste na aspiração do ar através da torta, através do mesmo vácuo utilizado para a sua criação, de modo a arrastar o líquido intersticial da torta.

3. Descarga

A pressão no interior do disco é invertida, do vácuo para uma pressão positiva, permitindo o sopro da torta aspirada e a desobstrução dos poros da tela.

O filtro vertical é composto por vários discos paralelos, sendo cada um deles subdividido em setores (**Figura 6-1**). Todos os discos são interconectados por uma

tubulação central que, além de servir como eixo, realiza o transporte do vácuo e do ar comprimido. A grande vantagem dos filtros à discos frente às demais opções de mercado se deve à enorme área filtrante quando comparada à área que ele ocupa numa usina. Ainda, o custo operacional é mais baixo.

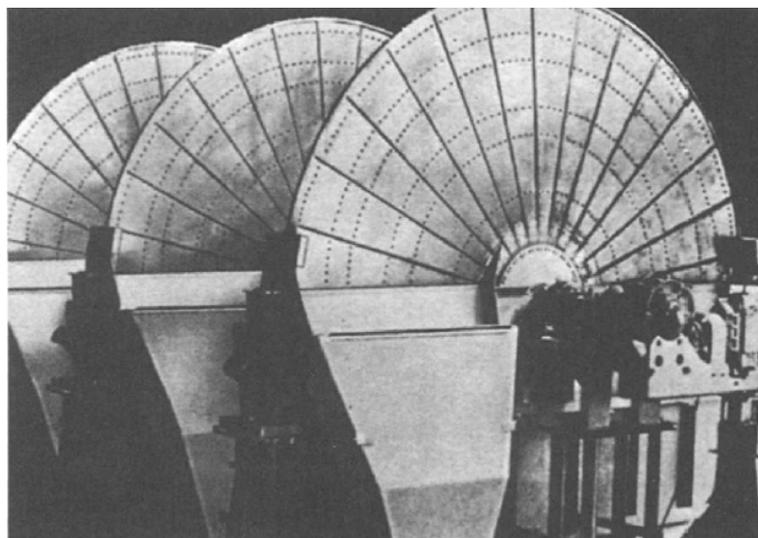


Figura 6-1: Filtro a Disco

Fonte: *Wills e Napier-Munn, 2006.*

O elemento filtrante geralmente utilizado é uma tela metálica ou um tecido, com boa permeabilidade, resistência mecânica e resistência à corrosão. Ele deve conter as camadas iniciais da torta, permitindo a passagem de água. Quando se utiliza o sopro de ar para a retirada da torta filtrada, naturalmente ocorre a limpeza do material.

Os seguintes fatores impactam diretamente na eficiência da etapa de filtragem (*Wills e Napier-Munn, 2006*):

1. A diferença de pressão entre a polpa e o elemento filtrante;
2. A área do elemento filtrante;
3. A viscosidade do material filtrado;
4. A resistência da torta à percolação de fluido (ligada à sua permeabilidade);
5. A resistência do meio filtrante e das primeiras camadas da torta a percolação de fluido.

6.2 Malhas de Controle Típicas

6.2.1 Controle do Vácuo

Um possível controle utilizado nos filtros à disco tem a finalidade de manipular o vácuo no eixo principal do equipamento. Para isso, existem duas possíveis formas de implementação, sendo uma delas com a utilização de uma malha de controle, conforme abaixo, e outra utilizando apenas intertravamento na lógica de controle.

Tabela 15 - Malha de Controle de Vácuo

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado de vácuo no eixo do equipamento, normalmente fixo e inserido pelo operador
PV	Vácuo no eixo do equipamento
MV	Sistema de vácuo (normalmente, controla-se o número de bombas de vácuo em operação)

Assim como mencionado para a pressão nos hidrociclones, deve-se considerar apenas faixas de operação do *set point*, evitando que ocorra acionamento constante dessas bombas de vácuo, já que essa variável manipulada interfere de forma descontínua no sistema.

Para a opção do intertravamento, pode-se também manipular o valor do vácuo no eixo do equipamento conforme o número de filtros em operação. Faz-se apenas uma atribuição direta entre o número de bombas de vácuo em operação conforme

números de filtros funcionando. Essa possibilidade, entretanto, não garante o valor do vácuo por não configurar uma malha fechada.

6.2.2 Controle de Rotação dos Discos

Outra malha usualmente empregada nos filtros a disco consiste no controle da velocidade de rotação dos discos conforme o nível de polpa no equipamento. Quanto menor o ciclo de rotação maior a produção, entretanto, maior será a umidade do produto (obviamente, a torta também será menor).

Tabela 16 - Malha de Controle de Rotação dos Discos

Elemento da Malha	Descrição
SP	Calculado conforme o nível da polpa
PV	Nível da polpa
MV	Rotação do disco

7. SEPARADOR MAGNETICO TIPO WHIMS

7.1 Processo

Os separadores magnéticos exploram as propriedades magnéticas dos elementos para permitir a separação do mineral de interesse da ganga. Existem vários tipos de separadores no mercado, sendo que o tipo WHIMS (de: *wet high intensive magnetic separators*) representam um grande avanço sobre os separadores magnéticos convencionais à seco, por permitir a separação de partículas ainda menores, de maneira eficiente. Dentre esse tipo de equipamento, o Separador Jones é o mais consagrado e será, portanto, o objeto desse estudo

Os separadores Jones consistem em grandes estruturas de aço, onde as placas magnéticas são fixadas, através das quais passam os anéis magnéticos (Figura **Figura 7-1**).

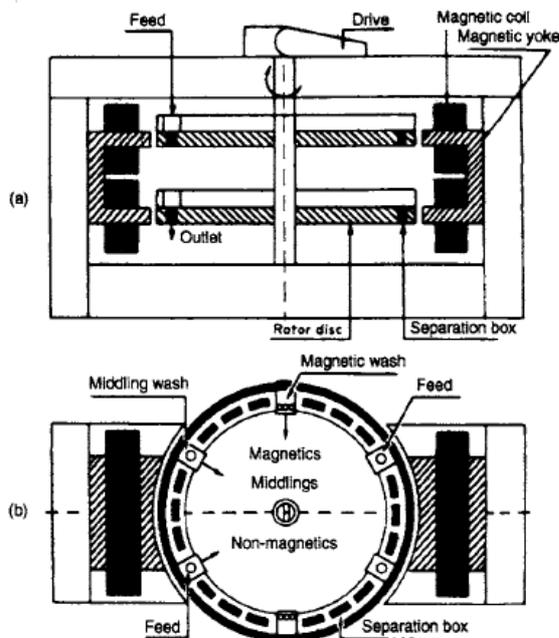


Figura 7-1 - Separador Magnético Jones

Fonte: *Wills e Napier-Munn, 2006.*

O feixe de placas paralelas, onde ocorre a separação, rodam como um carrossel, na circunferência do eixo principal. Nessas placas que ocorre a alimentação da polpa de minério, sendo essa alimentação na extremidade inicial do ponto de maior eletromagnetismo, conforme ilustrado na figura.

As placas retêm os materiais magnéticos, sendo que os minerais não magnéticos passam diretamente para a área de limpeza. As impurezas retidas nas placas são lavadas a partir de um jato de água sob baixa pressão, antes da saída do mineral da área sob influência magnética (lavagem dos médios ou *middling wash*, na Figura **Figura 7-1**), evitando a retirada de materiais de interesse.

Por último, em uma área neutra eletromagneticamente, numa zona intermediária entre os dois pólos magnéticos, ocorre a limpeza do material de interesse (paramagnético), através de um jato sob alta pressão, de aproximadamente 5 bar.

Conforme Wills e Napier-Munn (2006), separadores WHIMS têm sido utilizado para minérios de ferro com baixo teor, principalmente hematitas, sendo até mesmo possível a substituição da flotação.

O custo de implantação da flotação é de aproximadamente 20% do custo de implantação desses separadores magnéticos, por outro lado, o custo operacional dela pode superar em até três vezes o custo dos separadores WHIMS. Por esse motivo, é imperativo levar em consideração o período pelo qual se pretende utilizar sua planta. Para valores superiores a 10 anos, a opção pela implantação do WHIMS já passa a ser vantajosa.

7.2 Malhas de Controle Típicas

7.2.1 Controle da Densidade de Alimentação do Jones

A densidade da polpa de alimentação é uma variável operacional importante para se controlar no separador magnético, tendo em vista que esse parâmetro impacta diretamente na eficiência do processo.

Polpa muito densa dificulta a separação, por outro lado, polpas muito diluídas reduzem a produtividade, por processar água desnecessariamente.

O *set point* dessa malha geralmente é inserido pelo operador, com base em sua experiência do processo.

Tabela 17 - Malha de Controle de Densidade da Alimentação do Separador Magnético

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado para a densidade de alimentação no separador, normalmente fixo e inserido pelo operador
PV	Densidade da polpa
MV	Válvula de adição de água no sump

Esse controle é realizado numa caixa (*sump*) de maneira prévia à adição da polpa no separador.

7.2.2 Controle de Pressão da Água de Lavagem

A pressão da água de lavagem do concentrado e do material intermediário é outra variável relevante para o processo, com impacto direto na eficiência da separação.

Uma pressão muito alta na retirada do material intermediário pode significar perda de material de interesse. Por outro lado, pressão baixa não é eficaz para a retirada da impureza.

Já o jato de água para a retirada do mineral magnético, uma pressão muito alta causa perda de água desnecessariamente, sendo que uma pressão baixa pode não ser suficiente para a sua retirada.

Pode-se coexistir as duas malhas independentes, uma para a retirada de material intermediário e outra para a retirada de material magnético, assim como apenas uma dentre essas duas citadas.

Tabela 18 - Malha de Controle de Pressão de Água de Lavagem

Elemento da Malha	Descrição
SP	Valor desejado para a pressão da água de lavagem, normalmente fixo e inserido pelo operador
PV	Pressão da água de lavagem
MV	Válvula de controle da tubulação de água

Da mesma forma, não é prática incomum a inexistência de ambas, deixando a válvula de controle de água numa posição fixa preestabelecida, ou operada localmente pelos operadores.

7.3 Intertravamentos

Um intertravamento relevante na operação dos separadores magnéticos refere-se ao número de equipamentos em operação. Geralmente, esses separadores são instalados em conjunto, permitindo a operação em paralelo e aumentando sua capacidade operacional.

Por outro lado, pode-se causar um inconveniente deixá-los operando quando não há demanda suficiente. Para suprimir esse problema, existe uma possibilidade de intertravar o número de equipamentos em operação com a vazão mássica mensurada na alimentação.

Essa massa, por sua vez, é calculada a partir de dois medidores em série, sendo um medidor de vazão e um densímetro.

8. CONCLUSÃO

As malhas de controle possuem importante papel na eficiência do processo, levando em consideração a redução da variabilidade operacional que elas trazem. Para seu perfeito funcionamento, entretanto, faz-se necessária a garantia da funcionalidade dos instrumentos, o que requer manutenção periódica e criteriosa, o que geralmente não é visto nas empresas.

Ademais, a implantação das malhas descritas nesse documento leva em consideração e existência da instrumentação necessária para o funcionamento. Caso contrário, o investimento será maior, levando em consideração a especificação, compra, instalação e manutenção dos mesmos.

Por último, vale ressaltar a dificuldade em se justificar financeiramente a implantação de malhas de controle num processo, o que se deve, principalmente, aos ganhos serem de natureza mais subjetiva e intangível, como redução da variabilidade do processo. Mesmo que se tenha um ganho tangível e mensurável, inúmeras correlações estatísticas devem ser feitas, de forma a determinar o real fator gerador desse ganho.

O mais claro é que a aplicação das malhas numa usina gera processos mais coerentes e previsíveis, sendo possível o estudo e a identificação de problemas de forma mais coerente, devido ao aumento de sua natureza determinística.

9. REFERÊNCIAS

- BERGH, L.G. & Yianatos, J. B. Flotation column automation: state of the art. *Control Engineering Practice*, V. 11 (2003), pp: 67–72 .
- CHAVES, A. P. *Teoria e Prática do Tratamento de Minério, Volume 2*. 2ª Edição. São Paulo: Editora Signus, 2004.
- CHAVES, A. P. *Teoria e Prática do Tratamento de Minério: Flotação – O Estado da Arte no Brasil, Volume 4*. São Paulo: Editora Signus, 2006;
- ENDER, D. *Control Engineering Magazine*, 1993.
- KING, P. *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001.403 pp.
- LUZ, A. B. *et alii* (ed.).*Tratamento de Minérios* (4ª. Edição). Rio de Janeiro: Cetem, 2004. 855 p.
- LUZ, J. A. M. da. Ouro Preto: *Fracionamento Granulométrico de Sistemas Particulados (Notas de aula)*. Ouro Preto: Ufop, 2010. 120 p.
- OLIVEIRA, M. L. M. de *et alii*. Capítulo 11: Flotação em Coluna. In: LUZ, A. B. *et alii* (ed.).*Tratamento de Minérios* (4ª. Edição). Rio de Janeiro: Cetem, 2004. 885 P.
- PERSESCHINI, M. A. M. *Instrumentação de uma coluna de flotação Piloto para desenvolvimento de técnicas de controle avançadas*. 2001. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral). Belo Horizonte: Escola de Engenharia, UFMG, 2004.
- RAZUMOV, K. A. & PEROV, V. A. *Proyectos de Fábricas de Preparación de Minerales*. Moscú: Mir, 1985.
- WILLS, B. A. & Napier-Munn, T. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7ª Edição. Elsevier Science & Technology Books, 2006.