



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
Pós-Graduação *Lato Sensu* em Beneficiamento Mineral



**PRÁTICAS INDUSTRIAIS PARA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE EM  
CIRCUITOS DE FLOTAÇÃO MECÂNICA**

MONOGRAFIA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS COM  
ÊNFASE EM BENEFICIAMENTO MINERAL

**TIAGO CAIXETA NUNES**

**Ouro Preto, 2010**  
**TIAGO CAIXETA NUNES**

**PRÁTICAS INDUSTRIAIS PARA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE EM  
CIRCUITOS DE FLOTAÇÃO MECÂNICA**

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

**Orientador:** Professor Antônio Eduardo Clark Peres

**Ouro Preto**  
**Departamento de Engenharia de Minas – UFOP**  
**JUNHO / 2010**

**RESUMO**

Com o aumento da demanda de recursos naturais não renováveis e a exaustão de reservas com elevados teores dos minerais de interesse, surge a constante necessidade de otimizar cada vez mais as operações unitárias para atender às especificações de mercado. Diante de tal realidade, melhorias no processo e novos equipamentos e técnicas utilizadas na concentração de minérios estão em pleno desenvolvimento nos últimos anos. Dentre esses desenvolvimentos, destacam-se o crescimento do número de máquinas de flotação disponíveis no mercado e o aprimoramento do controle do processo aplicado a esta operação, envolvendo desde a preparação de reagentes, condicionamento, até a instrumentação associada ao controle na recuperação metálica em cada célula. Sabe-se que para atingir o rendimento metalúrgico desta operação, é necessário manter a flotação em condição de operação estável. O objetivo do presente trabalho é definir algumas práticas industriais relacionadas ao controle e à instrumentação nas células de flotação para auxiliar no desenvolvimento mais efetivo da operação. Assim, espera-se a definição das principais práticas a serem adotadas para garantir uma melhor performance da operação com um bom rendimento metalúrgico, menor consumo de reagentes, procedimentos de calibração e manutenção de equipamentos e instrumentos. Além disso, práticas para um condicionamento correto, adequação da alimentação, estratégias de controle adequadas, ferramentas para análise e rastreabilidade do processo, dentre outros, visando sempre otimizar a produção, aumentando a eficiência da recuperação, garantindo a disponibilidade da operação e reduzindo custos.

**Palavras chaves:** Flotação, Instrumentação, Controle, Recuperação Metálica.

## **ABSTRACT**

With an increased demand for nonrenewable natural resources and depletion of stocks having elevated levels of desired minerals, emerges an even more constant need to optimize the unitary operations to attend market specifications. As consequence, progress towards the process, new equipments and techniques utilized on mineral concentration have been fully developed over the last years. Among them, stand out an increased number of available flotation machines in the market and an upgrading of the process control applied to this operation, it involves from reagents preparation, conditioning, up to the instrumentation control associated with metal recover in each cell. It is known that to obtain a metallurgical recovery of this operation, it is necessary to maintain the stability of the flotation. In this work, the goal is to define some industrial practices related to the control and instrumentation of flotation cells to gain a better insight into the development of this operation. Therefore, it is expected to describe the main practices to be adopted to assure a better operation performance with a good metallurgical yield, reduced consumption of reagents, calibration procedures and maintenance of equipments and instruments. Furthermore, practices for a correct conditioning, satisfactory feeding, adequate control strategies, tools for analysis and traceability of the process, among others, targeting production optimization, increase recover efficiency to guarantee operation availability at reduced costs.

**Keywords:** Flotation, Instrumentation, Control, Metallurgical Recovery.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 - Representação do princípio de uma célula de flotação mecânica.....	4
FIGURA 2.2 - Relação entre concentração do coletor e pH de início da flotação.....	9
FIGURA 3.1 - Pirâmide da Automação na Flotação. ....	13
FIGURA 3.2 - Transmissor de Pressão <i>Profibus PA</i> .....	14
FIGURA 3.3 - Diagrama de Controle em malha fechada.....	20
FIGURA 3.4 - O nível controla a abertura da válvula .....	21
FIGURA 3.5 - Caixa de conexão da medição de nível. ....	22
FIGURA 3.6 - Possibilidades de controle na dosagem de reagentes .....	23
FIGURA 3.7 - Componentes básicos de <i>hardware</i> para o sistema de controle .....	25
FIGURA 3.8 - Diagrama esquemático controladores <i>feed-back</i> e <i>feed-forward</i> .....	25
FIGURA 3.9 - Controle para células convencionais .....	26
FIGURA 3.10 - Interface do sistema especialista com o sistema de controle.....	32
FIGURA 3.11 – Medição da velocidade do arraste de bolhas na espuma da Flotação ..	33
FIGURA 3.12 – Estrutura do sistema do Concentrador Hitura .....	34

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 3.1 ..... 16

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Metodologia adotada.....	2
<b>2. PROCESSO .....</b>	<b>3</b>
2.1. Variáveis do Processo.....	4
2.2. Condições Operacionais.....	6
2.2.1. Condicionamento Correto .....	7
2.2.2. Adequação da alimentação (fluxo e teor).....	8
2.2.3. Dosagem e adição de reagentes .....	8
2.2.4. Transporte de polpas.....	8
2.2.5. Água .....	8
2.2.6. Análise do pH da polpa .....	9
2.2.7. Temperatura da polpa .....	9
2.2.8. Nível da Espuma.....	10
2.2.9. Sistema de agitação .....	10
2.2.10. Aeração na polpa.....	10
2.2.11. Tempo de residência na célula (Tempo de flotação) .....	11
2.2.12. Volume útil da célula e número de células por banco.....	11
2.2.13. Redução do Consumo de Reagentes.....	11
2.2.14. Tempo de Residência.....	11
2.2.15. Padronização das células .....	12
<b>3. HIERARQUIA DO SISTEMA DE CONTROLE NA FLOTAÇÃO.....</b>	<b>13</b>
3.1. Instrumentação.....	14
3.1.1. Medições.....	14

3.1.1.1.	Análise por imagem e <i>on-line</i> .....	15
3.1.2.	Estratégias para Instrumentação .....	16
3.1.2.1.	Instrumentação e Controle Básicos .....	16
3.1.2.2.	Instrumentação para medição do nível de polpa.....	17
3.1.3.	Medição da Aeração.....	18
3.1.4.	Boas Práticas na Instrumentação .....	18
3.2.	Estratégias de Controle Básico.....	19
3.2.1.	Controle na Célula de Flotação .....	20
3.2.1.1.	Controle do Nível da Polpa .....	20
3.2.1.2.	Taxa de aeração .....	22
3.2.1.3.	Controle e Dosagem de sistemas de reagentes.....	22
3.2.2.	Controle Básico.....	24
3.2.2.1.	Desenvolvimento em Controle de Hardware .....	24
3.2.2.2.	Níveis de Controle .....	24
3.2.3.	Opções de Controle Básico .....	26
3.3.	Estratégias de Controle Avançado / Sistema Especialista.....	27
3.3.1.	Inteligência Artificial .....	28
3.3.2.	Tipos e vantagens de Sistemas Especialistas.....	30
3.3.3.	Sistema Especialista na Flotação .....	31
3.4.	Otimização.....	33
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>37</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento na demanda de recursos naturais não renováveis e a exaustão de jazimentos com teores dos elementos de interesse mais elevados têm colocado a indústria mineral frente ao desafio de beneficiar minérios mais complexos e tendo que atender às especificações de mercado, que estão cada vez mais restritas. Considerando essa realidade, novos equipamentos, instrumentos e técnicas de controle para a concentração de minérios têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Entre esses desenvolvimentos, a flotação mecânica tem obtido excelentes resultados para tratamento de minérios mais complexos, com teores baixos e granulometria de liberação mais fina. Geralmente, circuitos de flotação apresentam algum tipo de problema de controle e a solução deste problema requer alguma ferramenta ou investimento especial para ser alcançada.

Atualmente existem diversas estratégias de controle implementadas em diversos circuitos de flotação em várias plantas do mundo. Estas estratégias mudam continuamente devido à elevada evolução da instrumentação e das tecnologias de controle e soluções de mercado. Recentemente, o desenvolvimento da instrumentação tem fornecido novos dispositivos como, por exemplo, analisadores de imagens *on-line* e diversos tipos de medições com tecnologias *fieldbus*, possibilitando a produção de instrumentos inteligentes, que além da medição da variável analógica, fornecem auto-diagnósticos da qualidade da medição e estado do dispositivo.

A partir da instrumentação necessária é preciso estabelecer um controle automático que atue na planta otimizando a performance durante a ocorrência de distúrbios que ocorrem nas células de flotação. Após estas perturbações no circuito, a operação precisa analisar e compensar atuando no processo de diversas maneiras como no controle de nível, dosagem de reagentes, taxa de aeração, água de lavagem, etc. Como este é um problema muito complicado por se tratar de um sistema multivariável e não-linear pode-se utilizar desde técnicas de controle básico até técnicas de controle avançado, que comunicam diretamente com controladores lógicos programáveis CLP`s ou sistemas de controle distribuídos DCS, atuando em tempo real em determinadas variáveis.

### 1.1. Objetivos

Apresentar algumas formas de instrumentação, controle e práticas industriais utilizadas na flotação convencional. Dessa forma, é necessário realizar as seguintes atividades:

- entender o processo e analisar as variáveis existentes;
- avaliar os principais pontos de melhorias operacionais;
- apresentar a pirâmide do sistema de controle que pode ser utilizada na flotação, através da descrição de seus níveis: instrumentação, controle básico, controle avançado e otimização;
- obter algumas informações de boas práticas utilizadas nas plantas e pontos de melhorias.

A realização destas etapas proporcionará um melhor entendimento da relação da automação com a flotação através da instrumentação e controle para melhorar o desempenho do processo.

### 1.2. Metodologia adotada

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a necessidade de reunir informações relacionadas ao controle e utilização de boas práticas na flotação, que levou à sua concepção a partir da descrição dos elementos que constituem a pirâmide da automação, com base em conhecimentos teóricos e de profissionais que convivem com algum dos níveis da pirâmide frequentemente. Foi necessária a utilização de diversas fontes de pesquisa para reunir as informações pertinentes, tais como revistas técnicas sobre automação, instrumentação e controle, livros e documentos sobre mineração, artigos, estudos de caso e sites na internet.

Sendo assim, espera-se que esta monografia possa ser referência para profissionais e estudantes que tenham interesse em entender e até mesmo otimizar a capacidade da recuperação metálica no circuito de flotação através de alguma alternativa nas condições de operação, manutenção, instrumentação ou controle do processo, contempladas no desenvolvimento.

## 2. PROCESSO

Flotação em espuma ou simplesmente flotação é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies presentes. O método trata misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa (polpa). A seletividade no processo de flotação se baseia no fato de que as superfícies de diferentes espécies podem apresentar diferentes graus de hidrofobicidade (Araujo e Peres, 2006). A hidrofobicidade está associada à umectabilidade de uma partícula, ou seja, um minério hidrofóbico se adere às bolhas de ar em uma célula de flotação e são transportadas para a superfície de onde são removidas. Já as partículas hidrofílicas permanecem em suspensão e são recobertas por moléculas de água.

A separação entre as partículas ocorre fazendo-se passar um fluxo de ar através de uma suspensão aquosa contendo a espécie que se deseja separar. Como na flotação a fase líquida é sempre a água, molécula com característica polar, e a fase gasosa é sempre o ar, constituído por moléculas apolares, pode-se concluir que uma partícula hidrofílica é polar e uma hidrofóbica é apolar.

Como cada mineral possui uma superfície característica, teoricamente, a flotação pode ser aplicada em qualquer situação. Além disso, a flotação tem muito mais tolerância aos finos quando comparada aos métodos físicos de concentração (Baltar, 2008).

Para que a flotação ocorra é necessário que alguma espécie mineral seja hidrofóbica. Como existe apenas uma pequena quantidade de minerais hidrofóbicos naturais, é preciso uma adição criteriosa de reagentes para transformar partículas hidrofílicas em hidrofóbicas, possibilitando que a flotação seja uma operação unitária utilizada no tratamento de minérios para qualquer tipo de material. Geralmente, os reagentes são adicionados em equipamentos denominados condicionadores, que retém o fluxo de polpa a caminho das células e que podem ser classificados de acordo com sua função específica no processo, como: espumante, coletor, depressor, ativador, regulador de pH e dispersante, entre outros.

A flotação convencional é realizada através de um equipamento chamado de célula mecânica de flotação que consiste basicamente de um tanque, dotado de sistemas de agitação, aeração, controle de nível de polpa e raspagem de espuma, conforme FIGURA 2.1. Para que a flotação ocorra de forma efetiva deseja-se a

presença de bolhas de pequenos tamanhos para que possam capturar o maior número possível de partículas coletadas. Para isso, é necessária a fragmentação das bolhas que são geradas no rotor e que é feita pelo estator.

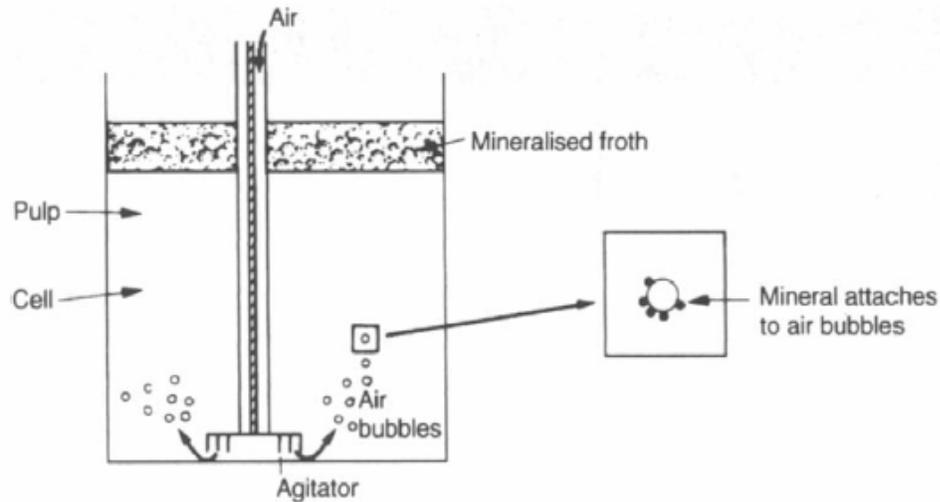


FIGURA 2.1 - Representação do princípio de uma célula de flotação mecânica  
Fonte: WILLS, 2006

Em escala industrial, as células são combinadas em diferentes circuitos e estágios, de acordo com as características específicas do minério e com testes realizados previamente em escala laboratorial ou até mesmo uma planta piloto, dependendo de cada caso.

### 2.1. Variáveis do Processo

A flotação é um processo complexo que possui diversas variáveis envolvidas, as inter-relações entre essas variáveis são não lineares e existe o problema não se medir diretamente variáveis importantes que afetam o processo, além de ocorrer interação entre essas variáveis do sistema. A matéria prima utilizada e o processo da moagem, que precede a flotação, estão diretamente relacionados com grande parte das características dessas variáveis.

A maior limitação das estratégias clássicas de controle na indústria mineral e metalúrgica reside no fato de que as inter-relações entre as diversas variáveis do processo são não lineares, como citado anteriormente, e pelo fato de apresentarem tempos de residência muito elevados.

Para que a flotação apresente um bom rendimento, é necessária a combinação de uma série de fatores que vão desde a medição das variáveis do processo até técnicas de controle avançado que permitem otimizar a operação. As variáveis mais importantes da flotação, sob o ponto de vista do controle de processo, podem ser classificadas como:

- Variáveis medidas

Entre as variáveis medidas destacam-se o volume da vazão de alimentação, densidade da polpa, distribuição de tamanho, nível de tanque, medição de pH, concentração de coletor, consumo energético, dentre outros. Estas variáveis podem ser facilmente medidas através de instrumentos disponíveis no mercado, apresentando uma boa precisão desde que os mesmos estejam devidamente calibrados.

- Variáveis físicas manipuladas

Dentre as variáveis físicas que podem ser manipuladas durante o controle da flotação, destaca-se a taxa de aeração (somente no caso de máquinas de ar forçado, pois o controle não é possível nas máquinas autoaeradas), controle do nível do tanque, velocidade do impelidor, tempo de condicionamento.

- Variáveis químicas manipuladas

Destacam-se basicamente a adição dos reagentes do processo, ponto onde os reagentes são adicionados no processo e potencial eletroquímico, dentre outras.

- Variáveis controladas

As principais variáveis controladas são a recuperação e teor do mineral útil no concentrado. Também são controladas granulometria, carga circulante, percentual de sólidos na alimentação, nível da célula e alimentação, dentre outras. Segundo Persechini (2001), os valores destas variáveis são obtidos após a análise química de amostras (o que demanda tempo) ou são estimados com o auxílio de modelos que levam em consideração outras variáveis do processo (em geral modelos estáticos), o que torna a utilização direta de valores da recuperação e do teor inadequados para projeto de sistemas de controle.

- Distúrbios

Típicos distúrbios que ocorrem são a composição mineralógica, taxa de alimentação, granulometria da alimentação, percentual de sólidos na alimentação, viscosidade e densidade da polpa, qualidade da água (pH, turbidez e temperatura).

A maioria dos distúrbios durante a operação da flotação alteram as propriedades do material que alimentam a flotação ou instabilidades na moagem. Segundo Pate e Herbst (1999), em plantas onde a moagem autógena ou semi-autógena é utilizada, a taxa de alimentação varia bastante, e mudanças na alimentação de percentual de sólidos de 10% ou mais são comuns. Com isto, percebe-se que a instabilidade sempre ocorrerá e deve-se estudar uma técnica de controle e operação para minimizar e atuar rapidamente nos distúrbios ocorridos.

Para otimizar a produção é preciso que a operação ocorra de forma automática através de um bom controle do processo. As variáveis mais importantes envolvidas são:

- composição mineralógica do minério;
- propriedades da polpa (densidade, minerais);
- taxa de alimentação da polpa;
- potencial eletroquímico;
- reagentes químicos e taxa de dosagem dos mesmos (espumantes, coletores, depressores, ativadores, etc.);
- nível da polpa;
- taxa de aeração da célula;
- propriedades da flotação (velocidade, tamanho da bolha, distribuição, estabilidade);
- propriedades das partículas (distribuição de tamanho, grau de liberação);
- concentração do mineral na alimentação, concentrado e rejeito, etc.

## 2.2. Condições Operacionais

Existem diversos fatores que influenciam no rendimento da operação da flotação. Dentre estes, destacam-se alguns que independem da equipe de operação da planta como, por exemplo, fatores relacionados às características do minério (granulometria, composição química, etc.) e equipamentos utilizados no processo.

Uma maneira de aumentar o rendimento através das condições operacionais seria através da escolha correta e adequada do circuito da flotação e equipamentos antes mesmo da operação da usina. Na etapa de projeto é necessário estudar as características do minério a ser beneficiado através de uma correta amostragem do

corpo do minério, realizando testes em escala laboratorial. Para confirmar e comprovar estes resultados, é aconselhado também efetuar uma montagem em escala semi-industrial através de uma planta piloto. Estes testes preliminares também são importantes para determinar a escolha dos reagentes e capacidade da flotação da planta. Testes de flotação em escala laboratorial fornecem uma base para a construção da planta, através de informações como:

- fornecer dados para o projeto de funcionamento contínuo;
- comparar custos entre diferentes configurações do circuito;
- comparar a performance do equipamento ;
- demonstrar a viabilidade do processo para os investidores.

Com a planta piloto, pode-se estudar e testar toda a instrumentação necessária para maximizar a recuperação metalúrgica, além da possibilidade de poder simular e testar o sistema de controle clássico ou controle avançado. Esta etapa é muito importante uma vez que após a implantação e comissionamento da usina torna-se, às vezes, inviável ou muito caro modificar o circuito da flotação, caso o minério em questão não obtenha o rendimento desejado.

Além das condições operacionais que podem ser analisadas antes da implantação de uma usina de concentração, e além de fatores relacionados às características do minério, existem também alguns fatores que podem ser controlados de modo a influenciar fortemente no resultado da operação. A seguir, tem-se uma breve descrição de várias condições operacionais que devem ser analisadas, a partir de testes em escala laboratorial e em planta piloto, abrangendo desde a fase de implantação de projetos e dimensionamento de equipamentos, até a operação da usina:

### 2.2.1. Condicionamento Correto

Sabe-se que o condicionamento é uma operação auxiliar durante o processo da flotação, que tem o objetivo de manter as partículas minerais com determinado reagente por um intervalo de tempo, que varia de caso a caso. O equipamento onde é realizada esta operação é denominado de condicionador. O condicionamento correto é um fator muito importante para se reduzir o tempo de flotação, existem casos onde se precisa prolongar o tempo da reação entre reagente-minério e a adição do reagente pode ser até mesmo antecipada para o moinho.

### 2.2.2. Adequação da alimentação (fluxo e teor)

É recomendável que o circuito cleaner opere com uma porcentagem de sólidos menor que o circuito rougher, para aumentar a seletividade da separação. Esta porcentagem de sólidos nada mais é do que a relação entre a massa de sólidos presente em uma polpa, dividida pela massa total da polpa em questão.

### 2.2.3. Dosagem e adição de reagentes

Sabe-se que cada minério é um problema único e que os reagentes devem ser cuidadosamente escolhidos durante os testes. Além disso, é essencial que a alimentação de reagentes seja feita no ponto correto e uniformemente distribuída na polpa, necessitando assim de uma malha de controle fechada entre a vazão da polpa e a taxa de dosagem de reagentes. Geralmente a sequência natural de dosagem é: modificadores, coletores e espumantes. Isto ocorre devido ao fato de que a superfície e ambiente químico devem estar adequados para garantir uma adsorção fácil e seletiva do coletor.

### 2.2.4. Transporte de polpas

É necessário avaliar a quantidade de reagentes dosados e definir o ponto ideal de adição dos mesmos no processo, para contribuir para um transporte efetivo. Para que o transporte de uma partícula hidrofóbica pela bolha ocorra, é necessário que não haja ruptura do conjunto bolha-partícula, o que só pode acontecer com a ação de forças internas. A probabilidade do transporte torna-se maior com a diminuição da turbulência, hidrofobicidade do material, aumento do tamanho da bolha e com a diminuição do número de partículas.

### 2.2.5. Água

Na grande maioria das usinas, não existe uma preocupação com a qualidade da água. Este fator pode ser importante, uma vez que as espécies químicas presentes na água podem influenciar no sentido de favorecer ou dificultar a adsorção do

coletor. A quantidade de espécies químicas presentes na água, como por exemplo, os cátions, que podem prejudicar a recuperação e a seletividade do processo.

#### 2.2.6. Análise do pH da polpa

O pH da polpa pode influenciar na carga elétrica das partículas, adsorção de reagentes, formação de precipitados, dispersão da água, ionização de reagentes e espécies químicas. Durante os testes iniciais e durante a operação da planta é fundamental o acompanhamento desta variável e atuar, se necessário, regulando o pH através da adição de ácidos ou bases. Exemplificando a importância da análise do pH, tem-se a FIGURA 2.2 onde se observa que o pH de início da flotação de galena, calcopirita e pirita depende da concentração do coletor.

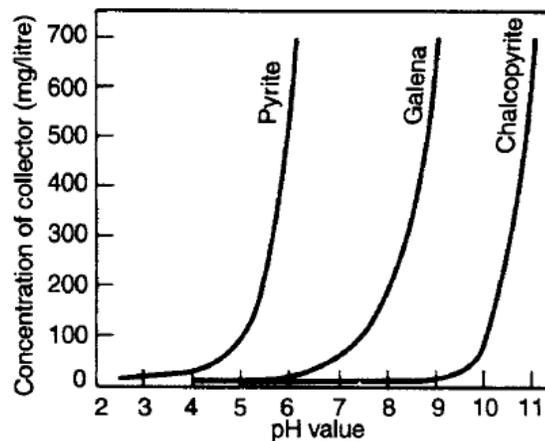


FIGURA 2.2 - Relação entre concentração do coletor e pH de início da flotação  
Fonte: WILLS, 2006

#### 2.2.7. Temperatura da polpa

A temperatura da polpa pode interferir na velocidade das reações, entretanto, água na temperatura ambiente é utilizada na maioria das aplicações. Existem casos em que a seletividade é impossível à temperatura ambiente, precisando adequar esta variável. Geralmente existe esta necessidade em países muito frios. A temperatura pode influenciar na solubilização de reagentes, dos minerais e na movimentação das bolhas. Por ter um custo alto, geralmente o aquecimento da polpa é uma variável negligenciada.

### 2.2.8. Nível da Espuma

É muito importante que o nível de espuma na célula se mantenha constante, de forma a evitar o transbordo e dar mais tempo para a espuma escoar. A espuma é localizada entre o nível da polpa e a superfície onde a espuma é removida. Esta espuma é formada por bolhas dispersas em meio líquido, que possui polpa aprisionada e que tendem a retornar para o fundo por gravidade. Antes disso é necessário realizar a remoção da espuma através de um arraste hidrodinâmico da polpa na parte superior das células. Geralmente as células de flotação possuem um sistema de controle para nível da polpa e conseqüentemente da altura da camada de espuma. Este nível é uma variável operacional muito importante, uma vez que está relacionada com vários fatores como: arraste hidrodinâmico, volume útil da célula durante a flotação, tempo de flotação, etc.

### 2.2.9. Sistema de agitação

A agitação e conseqüente dispersão das bolhas estão diretamente ligadas com o tempo requerido para ocorrência das reações químicas e físicas na célula. A agitação tem a função de provocar colisões mantendo as partículas em suspensão. Geralmente deve ser escolhida de forma a manter todas as partículas em suspensão com uma boa mistura com as partículas de ar. Deve-se garantir na parte superior um regime laminar para não comprometer a integridade do conjunto bolha-partícula mineral e na parte inferior um regime turbulento para facilitar as colisões.

### 2.2.10. Aeração na polpa

A aeração deve ser controlada de forma a garantir um fluxo ótimo para cada situação durante a operação, sendo necessária uma técnica de controle adequada. O fluxo de ar influencia em diversos fatores, como por exemplo, no volume útil da célula, probabilidade de transporte da partícula pela bolha e na turbulência do sistema.

#### 2.2.11. Tempo de residência na célula (Tempo de flotação)

Após os ensaios em escala piloto ou industrial do processo em batelada, é necessário ajustar o tempo de residência da flotação. Existem algumas partículas que atrapalham o rendimento da flotação, como as partículas finas, que possuem dificuldade de colidir com as bolhas; e as partículas mistas, que possuem apenas uma parte da superfície hidrofobizada. Como no início da flotação as partículas grossas são liberadas, à medida que a flotação tem continuidade nas células de um estágio, diminui-se a recuperação.

#### 2.2.12. Volume útil da célula e número de células por banco

É necessário avaliar se as condições fornecidas pelo fabricante se referem ao volume útil ou volume nominal da célula. Na prática, o volume útil é cerca de 65% a 75% do volume nominal (Chaves e Leal Filho, 2004). Outro fator importante de ser observado é o número de células por banco, para se evitar o curto-circuito do material flotável.

#### 2.2.13. Redução do Consumo de Reagentes

Em uma planta de flotação existe um elevado consumo de reagentes, como por exemplo, o consumo da amina e do amido na flotação no beneficiamento do minério de ferro. A partir daí vê-se a importância da possibilidade de reutilização de aminas, uma vez que gera uma enorme economia, proporcionando uma redução do custo da tonelada na produção. Para cada reagente utilizado no processo, deve ser estudada uma forma de reaproveitamento do mesmo, além de certeza da dosagem correta e de forma eficiente, para auxiliar na recuperação do mineral em questão.

#### 2.2.14. Tempo de Residência

O tempo de flotação é extremamente importante e pode ser determinado através de testes para se avaliar o tempo para a separação entre o concentrado e o rejeito. É preciso ressaltar que o valor encontrado irá depender da granulometria da alimentação e os reagentes da flotação, além de ser utilizado para calcular o tempo de residência.

#### 2.2.15. Padronização das células

Segundo Chaves e Leal Filho (2004), sempre que possível, é interessante padronizar os tamanhos das células dos diversos bancos. Isto acarretará principalmente a economia de peças de reserva e facilitará o trabalho de manutenção.

### 3. HIERARQUIA DO SISTEMA DE CONTROLE NA FLOTAÇÃO

O controle e otimização do processo na mineração emergiram-se a partir da década de 60, onde começaram a perceber e dedicar investimentos em tecnologias para melhorar o rendimento do processo em alguns elementos como: medição, *hardware*, estratégias de controle, manutenção e desenvolvimento. Na década de 70 houve uma grande dificuldade para a aceitação dos operadores do controle automático do processo. Com o advento do CLP, os padrões de algumas plantas foram concretizados possibilitando automatizar toda a escala industrial na mineração.

Atualmente, existem diversas tecnologias que podem ser utilizadas como: a capacidade de processamento de computadores pessoais, controle avançado, tecnologias de barramentos de comunicação digitais, disponibilidade de dados da operação e histórico via internet, etc.

Para o bom funcionamento do controle na flotação é interessante a combinação de diversos fatores, que combinados e adequados à condição operacional da planta podem proporcionar um ganho significativo de produção. Estes fatores envolvem uma instrumentação combinada com uma estratégia de controle, seja ela através de um controle básico ou através de um controle avançado, permitindo assim a otimização do processo. A FIGURA 3.1 representa um esquema da Pirâmide da Automação, aplicada para a flotação convencional.

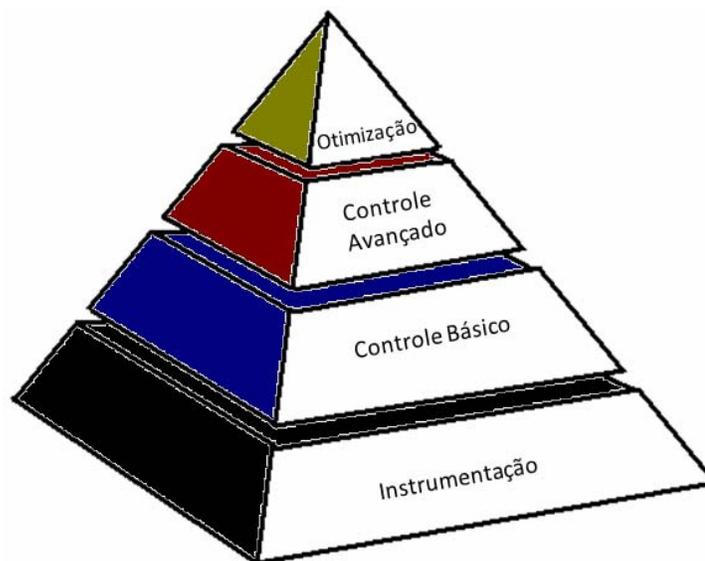


FIGURA 3.1 - Pirâmide da Automação na Flotação.

### 3.1. Instrumentação

#### 3.1.1. Medições

Para uma melhor eficiência na flotação é interessante primeiramente disponibilizar uma instrumentação eficaz e que seja responsável por garantir uma medição adequada e permitir a estabilidade do processo. Assim é possível resolver grande parte dos problemas e definir *set-points* e limites para algumas variáveis de acordo com o tipo do minério, granulometria, composição química, contaminação da alimentação, dentre outros, de acordo com a aplicação em questão.

O nível da pirâmide da instrumentação inclui os sensores (como por exemplo: vazão, temperatura, pressão, densidade, nível, etc.) que fazem medições de variáveis do processo e de elementos finais de controle utilizados para manipular variáveis no campo, como posicionadores e válvulas motorizadas.

A maioria dos sensores existentes são utilizados para o controle regulatório, como exemplo tem-se o transmissor de nível conforme FIGURA 3.2.



FIGURA 3.2 - Transmissor de Pressão *Profibus PA*

Fonte: <http://www.smar.com/brasil2/products/LD303.asp>

Geralmente o princípio de medição utilizado para o material ou polpa de um determinado mineral pode ser mais consolidado e indicado para determinada aplicação, dependendo do tipo de solução existente no mercado. Como exemplo tem-se a utilização de um medidor de vazão magnético ou ultrassônico para uma determinada aplicação. É preciso analisar criteriosamente durante a fase do Projeto

Conceitual as alternativas que podem ser utilizadas, para se ter uma boa medição, bem como os fornecedores e protocolo de comunicação da instrumentação encontrada no mercado. Isto evitará perdas por mal funcionamento das malhas de controle, troca da tecnologia adotada poucos anos após a implantação, além da confiabilidade na medição. Grande parte dos problemas que comprometem o rendimento da flotação atualmente ocorre pelo fato da instrumentação inadequada para a situação ou pelo modo da instalação da planta.

Outro fator importante a se observar é que algumas variáveis utilizadas para controle na flotação não são medidas diretamente, mas sim calculadas utilizando valores medidos de pressão e valores estimados de densidade. É necessário sempre minizar erros de calibração para aumentar a confiabilidade.

#### 3.1.1.1. Análise por imagem e *on-line*

Uma tecnologia desenvolvida recentemente e que vem sendo bastante utilizada na instrumentação é a utilização de análise de imagens na medição *on-line* de propriedades da espuma de flotação. Geralmente, o sistema consiste primariamente de câmeras e iluminação a led (*Light Emitting Diode*) instaladas acima nas células de flotação, remotamente conectadas a um ou mais computadores, que analisam as imagens provenientes das câmeras de forma *on-line* através de um *software* dedicado. Para esta aplicação é necessária a montagem das câmeras e da iluminação diretamente sobre a célula de flotação, dentro da borda da mesma. Benefícios consideráveis são alcançados quando estas medições por imagem são usadas diretamente por uma estratégia de controle avançado. Normalmente, há ganhos consideráveis em recuperação e / ou teor, permitindo períodos curtos para o *pay-back* do investimento.

Outro exemplo de sistema seria o analisador Courier, que é um sistema analisador de alta performance projetado para medições *on-line* precisas e confiáveis de elementos químicos concentrados nas polpas em vários pontos de amostragem como, por exemplo, nas flotações rougher, cleaner, scavenger e em pontos de rejeito, dentre outros. Com esta análise, facilita-se a alimentação de sistemas dedicados na flotação para um rápido monitoramento do processo, controle e gerenciamento das outras operações da planta.

### 3.1.2. Estratégias para Instrumentação

#### 3.1.2.1. Instrumentação e Controle Básicos

Antes de controlar uma célula de flotação, inicialmente é necessário conhecer a simbologia da instrumentação para melhor visão do processo e da forma como ocorre o controle para otimizar o processo. A seguir tem-se a

TABELA 3.1 com alguns exemplos das principais simbologias utilizadas na instrumentação.

TABELA 3.1

#### Identificação de Letras da Simbologia para Instrumentação e Controle

	FIRST-LETTER (4)		SUCCEEDING-LETTERS (3)		
	MEASURED OR INITIATING VARIABLE	MODIFIER	READOUT OR PASSIVE FUNCTION	OUTPUT FUNCTION	MODIFIER
A	Analysis (5, 19)		Alarm		
B	Burner, Combustion		User's Choice (1)	User's Choice (1)	User's Choice (1)
C	User's Choice (1)			Control (13)	
D	User's Choice (1)	Differential (4)			
E	Voltage		Sensor (Primary Element)		
F	Flow Rate	Ratio (Fraction) (4)			
G	User's Choice (1)		Glass, Viewing Device (9)		
H	Hand				High (7, 15, 16)
I	Current (Electrical)		Indicate (10)		
J	Power	Scan (7)			
K	Time, Time Schedule	Time Rate of Change (4, 21)		Control Station (22)	
L	Level		Light (11)		Low (7, 15, 16)
M	User's Choice (1)	Momentary (4)			Middle, Intermediate (7, 15)
N	User's Choice (1)		User's Choice (1)	User's Choice (1)	User's Choice (1)
O	User's Choice (1)		Orifice, Restriction		
P	Pressure, Vacuum		Point (Test) Connection		
Q	Quantity	Integrate, Totalize (4)			
R	Radiation		Record (17)		
S	Speed, Frequency	Safety (8)		Switch (13)	
T	Temperature			Transmit (18)	
U	Multivariable (6)		Multifunction (12)	Multifunction (12)	Multifunction (12)
V	Vibration, Mechanical Analysis (19)			Valve, Damper, Louver (13)	
W	Weight, Force		Well		
X	Unclassified (2)	X Axis	Unclassified (2)	Unclassified (2)	Unclassified (2)
Y	Event, State or Presence (20)	Y Axis		Relay, Compute, Convert (13, 14, 18)	
Z	Position, Dimension	Z Axis		Driver, Actuator, Unclassified Final Control Element	

Fonte: ISA 5.1 *Instrumentation Symbols and Society*, 1992.

Através das informações da

TABELA 3.1 é possível mostrar os controles mais utilizados no processo através da combinação de três letras da tabela como, por exemplo:

- LIT: transmissor e indicador de nível;
- FV: válvula de vazão;
- FIT: transmissor e indicador de vazão;
- FCV: válvula controladora de vazão, etc.

Um grande avanço relacionado à instrumentação foi o advento de alguns protocolos de comunicação digitais, como o *Foundation Fieldbus* e o *Profibus*. Esses protocolos permitem uma instrumentação inteligente, tanto de sensores, quanto de atuadores, que comunicam com o sistema de controle, possibilitando funcionalidades como diagnóstico, configuração, falhas e indicação da medição remotamente, uma vez que o instrumento estiver inserido e pré-configurado na rede de campo. Além disso, estes dispositivos podem ter diversos recursos como controle PIDs (controlador proporcional, integral e derivativo) internos, amostragem e filtros de sinais, etc. A instrumentação inteligente permite uma redução significativa em custos de engenharia, configuração, instalação e comissionamento, e também possibilita uma manutenção preventiva eficaz através de gerenciamento de ativos e configuração remota.

É importante ressaltar que para a instrumentação funcionar bem é preciso uma combinação com outros equipamentos do campo, que devem ser criteriosamente escolhidos durante a fase de projeto, como o tipo do controlador utilizado, quais tipos de protocolos de comunicação o controlador suporta, condicionamento de sinais, tipos de entradas e saídas E/S e possibilidade de expansão.

#### 3.1.2.2. Instrumentação para medição do nível de polpa

Para células de flotação em série, a medição de nível de polpa é a variável mais importante a ser monitorada e é um grande problema durante a operação. O nível normalmente apresenta bastante alteração durante a operação, principalmente quando ocorrem mudanças no tipo de material que está alimentando a usina, provocando distúrbios na célula.

A partir da medição do nível de espuma da célula é possível atuar em um mecanismo de controle de nível na caixa de descarga da célula como, por exemplo, através da utilização de válvulas dardo com acionamento pneumático.

### 3.1.3. Medição da Aeração

A aeração da polpa pode ser medida de diversas maneiras como, por exemplo, através de instrumentos de transmissão de pressão diferencial com tubo de Venturi, tubo de Pitot, etc. É necessário avaliar as características do processo antes da implantação para a especificação correta do sistema, uma vez que cada instrumento possui vantagens e limitações. Os transmissores de pressão diferencial são mais populares na indústria, devido à simplicidade do princípio, baixo preço e baixa necessidade de manutenção. A maioria dos problemas que ocorrem com estes instrumentos estão relacionados com o tipo da instalação.

### 3.1.4. Boas Práticas na Instrumentação

De forma a garantir o máximo aproveitamento e rendimento da instrumentação na flotação de uma determinada planta, é necessário analisar alguns fatores que, se observados com critério, podem trazer ganhos para as células, como:

- Procedimentos e problemas de calibração e manutenção

A instrumentação associada à flotação deve estar corretamente documentada e em pleno funcionamento em campo. Cada tipo de instrumento, de acordo com o fabricante, deve possuir um procedimento de instalação, operação, configuração, calibração e manutenção. Estes procedimentos são muito úteis, uma vez que permitem atuar na manutenção preventiva, antecipando-se da corretiva. Além disso, com uma equipe de instrumentação devidamente capacitada e treinada, podem-se diminuir tempos de paradas indesejadas com a atuação rápida no instrumento com problema. Como exemplo, uma configuração correta do *range* de um transmissor de nível ou um medidor de vazão agiliza o retorno da operação em questão após uma parada indesejada;

- Revitalização e aquisição de instrumentos

Após um determinado tempo de operação dos instrumentos e com o avanço da tecnologia, é interessante sempre avaliar a possibilidade da troca da instrumentação,

de acordo com a necessidade ou até mesmo durante a fase de renovação dos estoques de instrumentos utilizados atualmente na planta. É importante analisar casos de sucesso já implantados em outras unidades de flotação semelhantes, quantificar o ganho agregado no processo, o tempo para se pagar o investimento, treinamento adequado do fabricante e se o sistema de controle suporta a solução a ser implantada. Outro fator que ajuda a identificar a possível necessidade da aquisição de instrumentos para a flotação é o acompanhamento da gestão de ativos dos instrumentos;

- Ferramentas de análise e rastreabilidade do processo

Sempre que possível é aconselhado utilizar ferramentas de análise *on-line* desde o material que alimenta a célula até a descarga de todos os estágios da flotação, para atuar rapidamente no sistema de controle e garantir uma boa recuperação, principalmente no caso de ocorrerem distúrbios. Esta análise *on-line* geralmente alimenta o sistema controle que atua no processo. Outra ferramenta que pode auxiliar na rastreabilidade é o *Process Information Management System* – PIMS, que é uma ferramenta que adquire dados dos valores medidos pelos instrumentos obtidos do CLP e armazena o histórico através de diversas formas de representação, dependendo da aplicação. Esta ferramenta pode ajudar a encontrar a causa de possíveis problemas e estudar possibilidades para que o mesmo não ocorra novamente.

### 3.2. Estratégias de Controle Básico

O Controle Básico representa o segundo nível da Pirâmide de automação da flotação e neste nível define-se que o processo possui um ponto ideal de operação e o objetivo do controle é manter a variável de processo (PV) igual ao *set-point* (SP), para isso, manipulando a variável de controle (CO). O controlador lê o valor da variável de processo através de um instrumento no campo e o valor desejado, comparando estes valores e enviando um sinal para o dispositivo de controle, que irá atuar no processo corrigindo este desvio, visando aumentar a precisão do sistema e eliminar distúrbios. A FIGURA 3.3 - Diagrama de Controle em malha fechada FIGURA 3.3 apresenta um diagrama simplificado da forma como ocorre o controle automático básico em malha fechada.

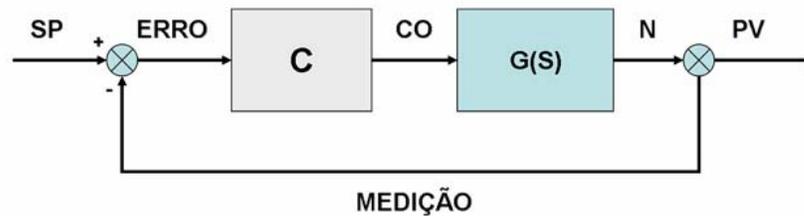


FIGURA 3.3 - Diagrama de Controle em malha fechada

O sistema de controle básico ou convencional utiliza *set-points* como referência nas malhas de controle para otimizar a flotação. Estes *set-points* são alterados de tempos em tempos pelos operadores, seja com base nos resultados emitidos pelo laboratório, análise de dados do sistema PIMS, inspeções realizadas na área operacional, ou por valores definidos por softwares de sintonia de malhas de controle, de forma a manter a qualidade do produto e recuperação em massa do circuito.

Apesar da existência de procedimentos operacionais, geralmente não há padronização na tomada de decisão. Distúrbios na recuperação mássica e metálica do processo podem ser compensados pela mudança dos *set-points* de algumas variáveis, com objetivo de se manter os teores de determinadas espécies no concentrado e rejeito nas metas pré-estabelecidas.

### 3.2.1. Controle na Célula de Flotação

#### 3.2.1.1. Controle do Nível da Polpa

Normalmente a partir de sensores de nível ultrassônicos é possível medir o nível de espuma e de polpa dentro das células de flotação. Com isso é possível atuar em um mecanismo de controle de nível na caixa de descarga da célula como, por exemplo, através da utilização de válvulas dardo com acionamento pneumático. Variando-se a posição vertical da válvula dardo é possível alterar o nível da polpa.

Cada banco de células possui um sensor de nível para medir o nível total (polpa mais espuma) e um sensor com flutuador e espelho refletor, com o objetivo de medir a altura da polpa, na interface polpa/ espuma.

A malha de controle da FIGURA 3.4 compara o valor de nível medido no banco de células com o valor do *set-point*. Em função do desvio encontrado, a malha irá

modular a abertura ou o fechamento das válvulas dardo de controle de nível situados na caixa de descarga do banco de células. Se o nível medido estiver acima do *set-point*, a malha irá aumentar a abertura das válvulas dardo para reduzir o nível, de modo a atingir o *set-point*. Se o nível medido estiver abaixo do *set-point*, a malha irá diminuir a abertura das válvulas dardo para aumentar a densidade, de modo a atingir o *set-point*. O nível de abertura ou fechamento da válvula é proporcional ao desvio de densidade no recalque da bomba.

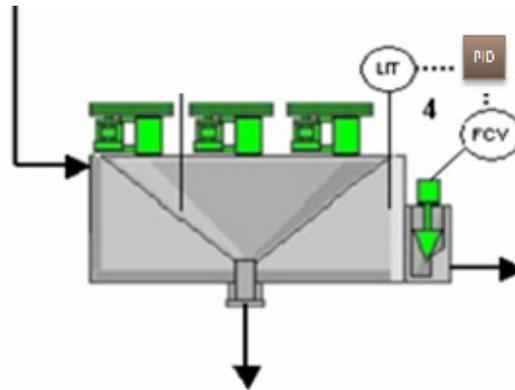


FIGURA 3.4 - O nível controla a abertura da válvula

O posicionamento vertical da válvula dardo em relação à sua sede permite aumentar ou diminuir restrição para a saída de polpa da célula, permitindo o controle de nível, conforme FIGURA 3.5.

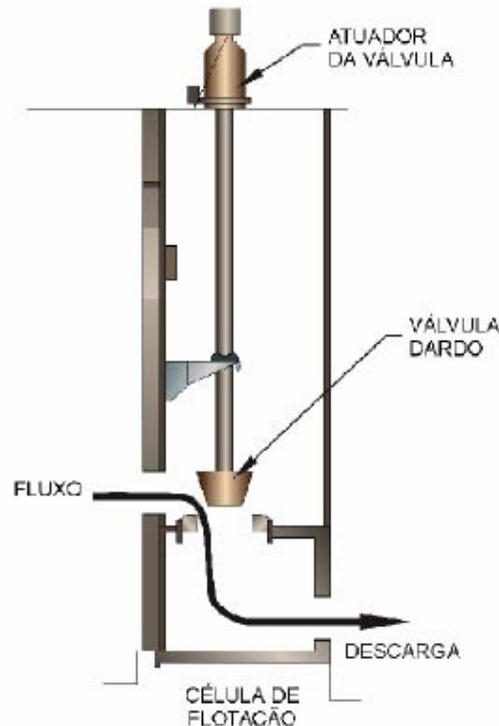


FIGURA 3.5 - Caixa de conexão da medição de nível.

### 3.2.1.2. Taxa de aeração

O correto dimensionamento das válvulas utilizadas para controle na aeração é um fator que deve ser observado durante o projeto, uma vez que válvulas subdimensionadas ou superdimensionadas no controle podem causar distúrbios no controle de nível da polpa na célula. O controle da aeração na flotação não é tão problemático e pode ocorrer através de um controle PID comum ou até mesmo através de controle avançado.

### 3.2.1.3. Controle e Dosagem de sistemas de reagentes

A taxa de alimentação de reagentes é geralmente setada para um valor de pior caso considerando uma margem de segurança sobre as condições. Porém, além de aumentar os custos com reagentes químicos, pode-se também diminuir a seletividade da flotação.

Geralmente a vazão na dosagem de reagentes é muito baixa e dificulta o controle da medição, normalmente esta dosagem ocorre em milímetros por segundo. Como estes valores variam bastante não é possível utilizar um controle manual, sendo



### 3.2.2. Controle Básico

#### 3.2.2.1. Desenvolvimento em Controle de Hardware

O *hardware* para o sistema de controle obteve uma grande evolução nos últimos anos com o avanço dos microprocessadores, permitindo controladores e SDCD's (Sistema Digital de Controle Distribuído) cada vez mais compactos, com mais funcionalidades e robustez. Os circuitos eletrônicos cada vez menores permitiram que atuadores inteligentes fossem fabricados, com a capacidade de funções de controle e protocolo de comunicação, além de prover a capacidade de auto-diagnóstico e troca de informações com o controlador. Gráficos de tendências, estados e defeitos de variáveis obtiveram várias funcionalidades para a monitoração remota.

#### 3.2.2.2. Níveis de Controle

Geralmente, a estratégia de controle de todo sistema utilizado na flotação pode ser dividido em três categorias:

- **Controle Regulatório**

Este é o nível mais inferior e envolve o controle da variável de processo utilizando um determinado valor fixo de *set-point*. Este controle pode ser analógico ou digital. Em algumas plantas, o controle de algumas variáveis é acompanhado manualmente pela equipe do processo. O primeiro passo para o controle regulatório é a definição do *set-point*, ajustando esta configuração do CLP da planta, que é comparado com a variável de processo e utilizado para acompanhar o valor desejado de acordo com um algoritmo de controle PID. Os requisitos básicos de hardware para este sistema são:

- medidor da variável de processo;
- transmissor do sinal analógico;
- conversor analógico-digital;
- computador;
- conversor digital-analógico;
- transdutor para converter o sinal analógico em uma forma mecânico;

- dispositivo de controle.

A FIGURA 3.7 apresenta alguns dos componentes básicos do *hardware* de controle.

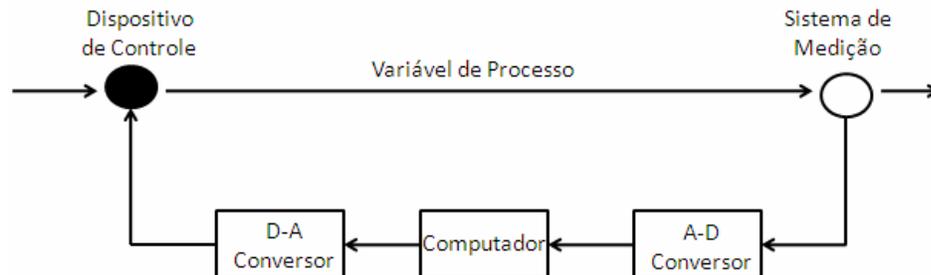


FIGURA 3.7 - Componentes básicos de *hardware* para o sistema de controle

### • Controle de Supervisão

Este controle envolve um cálculo para determinar o valor do *set-point* que a variável de processo irá ser operada utilizando outro processo de medição. Este tipo de controle usualmente compara a eficiência do processo através de algum critério de performance e determina um *set-point* em que a variável de processo deve operar. A

FIGURA 3.8 apresenta os dois tipos básicos de controle supervisorio, o *feed-back* e *feed-forward*. Nestes modos de operação é assumido que existe um valor ótimo o qual o processo deve operar e fazer com que as variáveis assumam este valor ótimo.

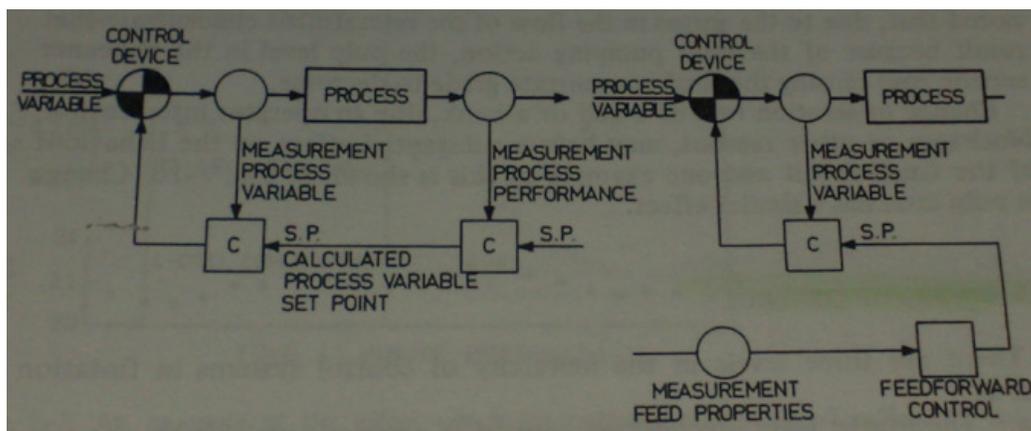


FIGURA 3.8 - Diagrama esquemático controladores *feed-back* e *feed-forward*  
Fonte: LYNCH, JOHNSON, MANLAPIG e THORNE, 2006

### 3.2.3. Opções de Controle Básico

A partir da definição da utilização do controle básico nas etapas de um projeto, deve ser apresentada uma solução de acordo com o definido para o sistema de controle. Para a visualização da operação da flotação na sala de controle os desenvolvedores do sistema de automação configuram telas no sistema de supervisão para animar a situação real no campo da atual condição operacional.

As telas do sistema de supervisão são animadas de acordo com os valores das variáveis recebidas do CLP, que por sua vez, possuem módulos de entrada e saída que comunicam com os instrumentos e equipamentos no campo. No caso da flotação, a operação consegue analisar diversas condições, como por exemplo:

- **Estado:** motor parado ou funcionando, operação em modo local ou remoto, válvula que alimenta o banco de células aberta ou fechada, etc;
- **Defeito:** falha de comunicação do medidor de nível, defeito de temperatura alta do motor, defeito no posicionador, defeito de posição na válvula, etc;
- **Comandos:** liga motor da célula de flotação, abre válvula de descarga do tanque, habilita malha de controle de nível em automático, etc;

Assim, é possível que a operação tenha conhecimento e atue nas opções de controle básicas através da interface com a animação das telas do processo. A FIGURA 3.9 apresenta um exemplo de tipos de controle básico em uma célula de flotação mecânica.

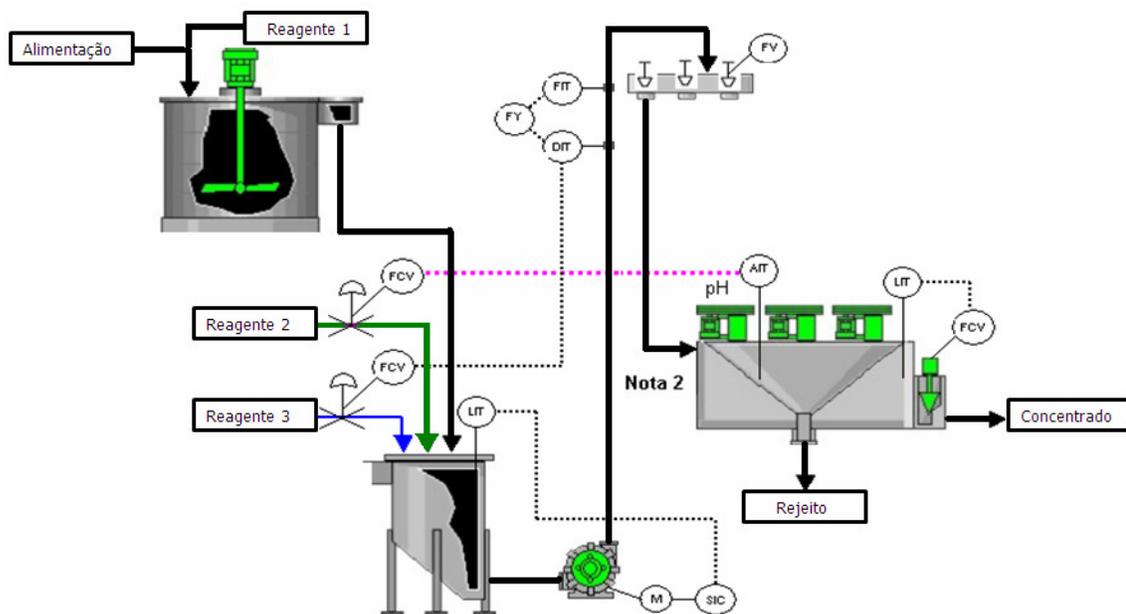


FIGURA 3.9 - Controle para células convencionais

Neste exemplo podem ser observadas algumas malhas de controles básicas como por exemplo:

- o valor do pH do medidor (AIT) controla a abertura da válvula do reagente 2 (FCV);
- o nível do tanque inferior (LIT) controla a velocidade da bomba (SIC) que alimenta o distribuidor das células de flotação;
- a densidade (DIT) da linha de descarga da bomba controla a abertura da válvula de adição do reagente 3 (FCV);
- o nível da célula de flotação (LIT) controla a abertura da válvula dardo de descarga de concentrado (FCV).

O controle da flotação irá operar através das etapas de uma determinada planta: rougher, cleaner, recleaner e scavenger. Durante a operação, espera-se que sejam atingidos os seguintes objetivos de controle:

- taxa horária de sólidos na alimentação da flotação;
- nível dos bancos de célula de flotação;
- vazão de ar nas células de flotação;
- dosagem ideal de reagentes;
- vazão de água de calha de rejeitos (material flotado).

É de responsabilidade conjunta das equipes de operação e de manutenção o gerenciamento das paradas operacionais e paradas de manutenção, de modo a se cumprir o rendimento operacional previsto de acordo com a estratégia de controle básico adotada. Para isto, é necessário o pleno controle sobre o planejamento e programação de paradas para manutenção, bem como o constante gerenciamento das operações de modo a se minimizar as paradas não previstas, sejam elas por motivos operacionais ou de manutenção. Além do gerenciamento das paradas da área, as características do minério também afetam a produtividade e devem ser consideradas no controle da produtividade.

### 3.3. Estratégias de Controle Avançado / Sistema Especialista

Atualmente a indústria mineral precisa investir de forma que a produção se mantenha lucrativa no mercado globalizado, uma vez que vários minerais tiveram seus preços reduzidos, apesar do consumo mundial de alguns metais e materiais ter

aumentado. Assim, desenvolvimento de novos projetos ou revitalização da mineração necessitam de tecnologias e equipamentos mais promissores, em à escassez de alguns recursos naturais e contra as crescentes pressões ambientais e comunitárias.

Os processos envolvidos apresentam características difíceis de serem tratadas somente com o emprego de controle regulatório sobre as variáveis operacionais atualmente manipuladas, o que pode resultar em grande variabilidade do processo. Uma maneira de otimizar a produtividade é através da utilização de sistemas especialistas ou sistemas de controle avançado, que constituem o principal elo de ligação entre processo e instrumentação, bem como entre a operação do empreendimento mineral e seu gerenciamento.

A tecnologia de controle avançado baseada permite inserir no sistema o *know-how* de especialistas em processo e operadores da planta, traduzindo-o em estratégias de controle para situações específicas. A seguir, tem-se alguns conceitos básicos de sistemas especialistas e algumas aplicações nas células mecânicas de flotação.

### 3.3.1. Inteligência Artificial

A inteligência artificial é o ramo da ciência da computação que estuda a utilização de computadores para simular ou duplicar algumas funções típicas do cérebro humano (Torres, 2002). O sistema especialista é um destes ramos da inteligência artificial que é baseado em conhecimentos e no processo, permitindo imitar um especialista humano na resolução de um determinado problema específico.

Inicialmente é preciso definir o domínio do conhecimento por pessoas através de treinamento, leitura ou experiência. Do ponto de vista de construção de um sistema, o conhecimento pode ser classificado em:

- Conhecimento estrutural: baseado em classes e regras;
- Conhecimento operacional: baseado em procedimentos, estratégias de busca, comunicação, etc;
- Meta-conhecimento: baseado em explicações, justificativas, relatórios, descrição de regras.

O conhecimento pode ser representado através de heurísticas, baseando-se em uma experiência humana vivida ou de forma intuitiva, podendo ser representado através de regras de decisão e análise. Como exemplo poderia citar algumas regras relacionadas à dosagem de cal para controle de pH em uma célula, caso o pH esteja baixo de acordo com determinadas condições de processo, eleva-se adição de cal no processo. Este caso pode ser uma regra pré-determinada para atuar no processo. Existem diversas formas e técnicas utilizadas para os sistemas especialistas como por exemplo:

- **Lógica Fuzzy**

A lógica *fuzzy* abrange todo o pensamento humano e se divide em diversas direções como a lógica pura, a lógica de valores e a lógica matemática. O modelamento *fuzzy* tem como vantagens a simplicidade dos modelos usados quando comparados aos modelos matemáticos, pois utiliza um conjunto de regras simples como “se velocidade da espuma baixa, adicione mais reagente”, ou “se nível baixo da célula, aumentar taxa de alimentação”. É importante lembrar que é preciso criar estas regras previamente baseadas em conhecimentos de engenheiros de processo, condições operacionais e até mesmo histórico das variáveis do processo quando atingiu-se uma produção elevada em determinado dia. Para o desenvolvimento de um sistema coerente deve-se observar que qualquer combinação entre as variáveis de entrada deve ativar pelo menos uma regra;

- **Redes Neurais**

As redes neurais são sistemas de modelamento e implementação computacional através do princípio de funcionamento do cérebro humano, comparando com a sinapse que ocorre entre os dendritos e axônios do cérebro. Neste sistema existem diversas entradas, saídas e múltiplos caminhos para alcançar um resultado, que é representado através de algum algoritmo computacional. É necessário uma grande quantidade de dados históricos para encontrar todos estes múltiplos caminhos de acordo com as condições do processo de forma a treinar a rede para a operação. As redes neurais dependem da qualidade dos dados utilizados no seu treinamento, permitindo uma capacidade de aprendizado e robustez contra perturbações e ruídos no processo. A partir do treinamento da rede para se atingir bons resultados, deve-se determinar os desvios para cada variável de saída. Uma das limitações das redes neurais é o grande volume de dados que deve ser baseado o treinamento da rede,

para representar as mais diversas situações do processo. Apresenta um elevado custo operacional nas fases de treinamento e configuração da rede.

- **Algoritmos genéticos**

Algoritmos genéticos são métodos computacionais que automatizam a busca de novas soluções para um determinado problema baseada em um algoritmo genético (modelo matemático) que transforma um conjunto (população) de objetos individuais, cada um com um determinado valor associado para uma determinada operação. Resumidamente, este algoritmo inicialmente define as variáveis de entrada e saída, cria a população, avalia o resultado de cada solução, cria uma nova população de solução (mutação) e se repete o ciclo. A solução que apresentar o melhor valor esperado é adotada como a solução do sistema.

### 3.3.2. Tipos e vantagens de Sistemas Especialistas

Os sistemas especialistas podem ser classificados em duas formas principais: sistemas consultivos (*off-line*) ou sistemas de controle em tempo real (*on-line*). O primeiro objetivam ser de aplicação geral e utilizam um banco de dados com um elevado número de regras baseadas em uma base de conhecimento.

Já o sistema *on-line* aplica-se em controle de usinas em tempo real para aumentar a confiabilidade, rapidez, produtividade e tomada de decisão durante a operação. Assim é necessário uma velocidade de resposta rápida no processo a partir de uma determinada análise. Geralmente estes sistemas combinam técnicas de inteligência artificial (lógica *fuzzy*, redes neurais, etc.) e aspectos de programação convencional, como por exemplo a plataforma KS (*Knowledgescape*) e OCS.

Alguns sistemas especialistas na flotação podem utilizar também modelamentos matemáticos como “instrumentos virtuais”, permitindo calcular o valor de um determinado parâmetro do processo não disponível pela instrumentação existente. Considerando a utilização destes sistemas nas áreas de moagem e flotação de uma usina de concentração, estima-se algumas vantagens com relação ao sistema de controle básico, como (Torres, Tratamento de minérios):

- aumento da vazão da alimentação da moagem;
- elevação da recuperação da flotação;
- elevação do teor de concentrado;

- redução do consumo de reagentes;
- maior estabilidade dos processos envolvidos no circuito;
- suporte à decisão do operador, liberando-o para outras atividades;
- redução dos custos de produção na Usina.

### 3.3.3. Sistema Especialista na Flotação

A principal funcionalidade do sistema especialista na flotação é a capacidade de ajuste automático do processo devido à percepção da constante variação na alimentação do minério na usina, uma vez que o minério é proveniente de depósitos heterogêneos. Assim estes sistemas analisam algumas características físicas ou químicas do minério, dependendo da aplicação, através de instrumentos de medição on-line no processo, podendo comunicar com o sistema de controle e atuar no processo de forma a otimizar a produção.

Antes de implantar o sistema, caso seja em uma usina já existente, é necessário uma auditoria tecnológica para avaliar as condições operacionais, de operação, instrumentação e sistemas de automação presente. Assim estes pontos devem ser avaliados para identificar oportunidades de aperfeiçoamento, que juntamente com o sistema especialista escolhido, irão atuar no processo. Devem-se avaliar criteriosamente alguns itens durante a escolha de um sistema especialista:

- plataforma de *software* a ser utilizada;
- características intrínsecas e necessidades do processo a ser controlado;
- tipo de interface com sistema de controle;
- treinamento e manutenção do sistema;
- instrumentação adicional necessária;
- custo e retorno do sistema a ser implantado;
- suporte do fornecedor;
- possibilidade de interface e expansão com outras áreas da usina;
- interface amigável do sistema para operadores, técnicos e engenheiros;
- aplicações existentes em outras usinas, assim como seus ganhos, etc.

No caso da flotação, os sistemas especialistas geralmente apresentam câmeras digitais e *softwares* de análise de imagem na espuma das células de flotação. Como exemplo, pode ser citado o sistema *Frothmaster* da empresa Outotec, o *FrothVision* da empresa CEMI e a plataforma KSX da empresa *Knowledgescape*.

Estes sistemas de controle avançado são capazes de interpretar automaticamente as informações a partir de dados do PLC, ou do DCS, utilizando várias técnicas avançadas para elaborar novos *set-points* das variáveis manipuláveis. Isto é possível através da tecnologia de análise de imagens avançada na medição *on-line* de propriedades da espuma de flotação.

O sistema consiste primariamente de câmeras e iluminação instaladas acima nas células de flotação, remotamente conectadas a um ou mais computadores, que analisam as imagens provenientes das câmeras de forma *on-line* via *software*. A montagem das câmeras e da iluminação é geralmente feita diretamente sobre a célula de flotação, dentro da borda da mesma. O computador para processamento é geralmente localizado na sala de controle da usina. Como exemplo, tem-se a FIGURA 3.10, que apresenta o sistema de controle.

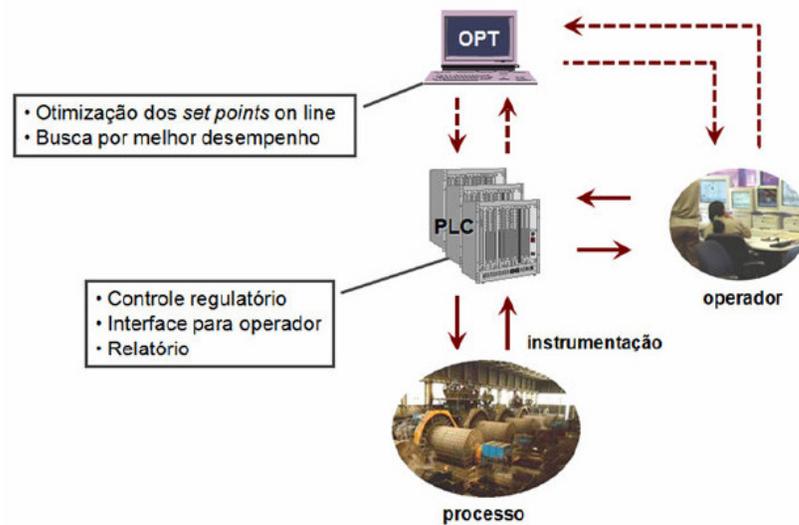


FIGURA 3.10 - Interface do sistema especialista com o sistema de controle.

A primeira ação do sistema geralmente é garantir que todas as células sejam operadas corretamente a todo tempo. Isto requer que uma câmera seja instalada sobre cada célula, tornando possível evitar situações nas quais algumas células não produzem espuma, assim como situações nas quais algumas células transbordam polpa, em vez de espuma apenas. Além disso, o sistema deve atuar em conjunto

com um sistema de controle otimizado permitindo gerar um perfil de velocidade de espuma adequado ao longo de um banco de células em tempo real, na medida em que os teores mudam ao longo do tempo, e o implementam. Na maioria dos casos isto é alcançado pela manipulação de *set-points* de nível e/ou taxas de aeração, quando possível, e reagentes, *set-points* para espumantes, coletores ou pH. Na FIGURA 3.11 pode-se visualizar a tela de um *software* apresentando pontos onde que através de um determinado algoritmo, medem a velocidade de arraste da espuma na célula de flotação.

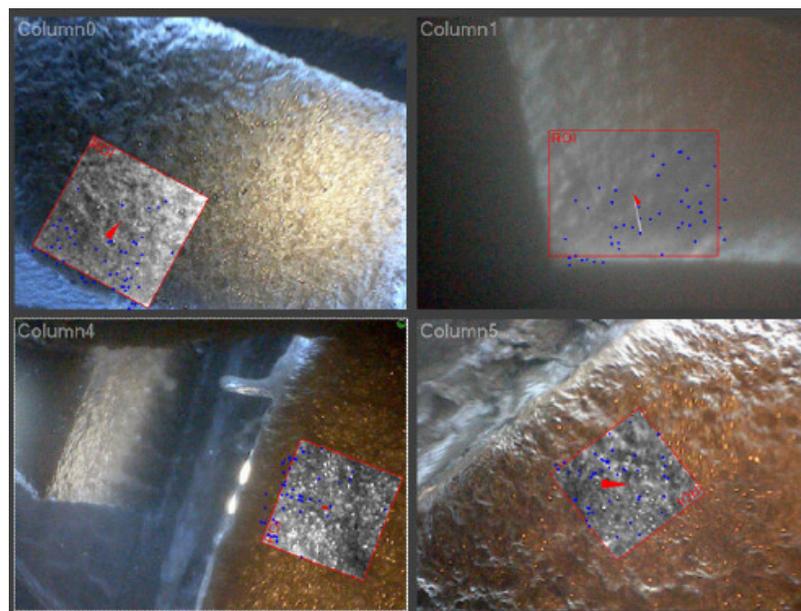


FIGURA 3.11 – Medição da velocidade do arraste de bolhas na espuma da Flotação

### 3.4. Otimização

Para a otimização da operação da flotação, inicialmente é preciso investir em alguns requisitos do sistema de automação e conhecimento do processo. Uma instrumentação apropriada e com malhas sintonizada ou através do controle avançado e multilinear podem ser essenciais. Outro fato importante e que pode auxiliar para a otimização do processo é a disponibilidade de analisadores *on-line* de granulometria em diversos pontos do processo, além da constante análise laboratorial. Com a produção é possível armazenar e analisar um banco de dados e

criar uma curva com o grau de recuperação do concentrado de um determinado tipo de minério.

Um fator muito importante de ser observado é a concentração da alimentação, que é uma importante e difícil tarefa, uma vez que para cada tipo de alimentação, deve haver uma correspondência com uma curva de recuperação desejada para encontrar a dosagem ótima de reagentes. A FIGURA 3.12 apresenta uma estrutura inteligente para otimizar a operação da flotação, através do Concentrador Hitura.

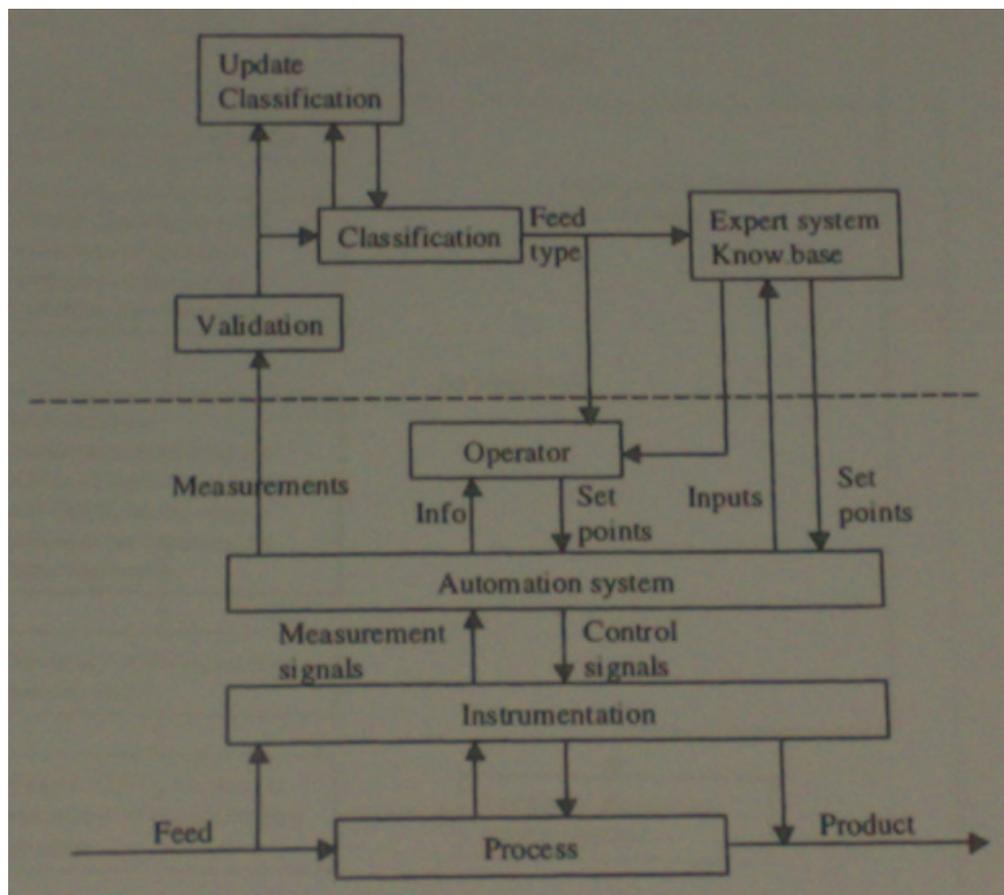


FIGURA 3.12 – Estrutura do sistema do Concentrador Hitura

Fonte: MULAR, HALBE, BARRAT, 2002

Além dos investimentos em instrumentação, controle básico, avançado, é extremamente importante o investimento em qualificação pessoal da operação e manutenção. São estas pessoas que convivem e vivenciam os problemas físicos e operacionais no dia-a-dia da produção de uma planta. A seguir, tem-se algumas importantes ações que devem ser observadas com a equipe da usina para se aproveitar o máximo que uma determinada planta pode oferecer:

- treinamentos em novas tecnologias, através de constantes reciclagens e simulações quando novas tecnologias são implantadas, como por exemplo a inserção de um novo instrumento ou implantação de um sistema especialista;
- avaliar se a quantidade de mão de obra é suficiente para a operação e manutenção;
- fiscalização e acompanhamento da operação através das equipes de processo, etc.

Normalmente é aplicado um programa de capacitação técnica de operadores que pode ser dividido em três fases:

Fase 1: *Start-up* da planta de beneficiamento e familiarização com os equipamentos através de estudos dos manuais com procedimentos de partida, parada, funcionamento de equipamentos na hora e ordem correta, lembrando que os procedimentos de segurança operacional sempre estão em primeiro lugar;

Fase 2: Treinamento teórico e prático das operações unitárias envolvidas no processo;

Fase 3: Treinamento específico em determinada operação unitária, como no caso da Flotação. Após o entendimento das operações e dos equipamentos por parte da operação, a empresa deve preparar manuais baseados na filosofia de operação da planta, com estratégias de atuar no processo quando ocorrerem distúrbios na planta, seja por variação da alimentação da usina, por parada inesperada de equipamento, dosagem de um determinado reagente, estudo de matrizes de causa-efeitos, avaliação do grau de recuperação, etc.

#### **4. CONCLUSÃO**

Existe hoje uma grande diversidade de estratégias de controle, técnicas de controle avançado, tecnologias e instrumentação aplicadas nas indústrias, sendo desenvolvidas por pesquisadores e fabricantes de equipamentos, com o objetivo de otimizar a performance da operação unitária da flotação. A combinação do conhecimento no processo, regime de controle de operação, instrumentação moderna e processamento de dados contribuem cada vez mais para aumentar o grau de automação e conseqüentemente a produção de uma planta.

Assim, pode-se perceber que a partir do levantamento de campo da situação atual da flotação em uma determinada planta, é possível pesquisar e encontrar soluções com as melhores práticas em automação e controle para melhorar o rendimento. Para isso, é necessário avaliar, além o grau de automação atual da planta, dos equipamento elétricos e mecânicos, das soluções de mercado, também de todo o contexto em que a produção se encontra, avaliando desde a manutenção até a forma como a planta em questão está sendo operada, objetivando sempre encontrar boas maneiras e soluções para aumentar a produtividade ou eficiência da flotação.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E. C.; ARAÚJO, Armando C.. **Teoria e Prática no Tratamento de Minérios: Flotação: o estado da arte no Brasil**. 1 Ed. São Paulo, Signus Editora, 2006, v. 4.

WILLS, B. A., NAPIER-MUNN, T. **Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral**. 7 ed. Oxford, Reino Unido. Elsevier Science & Technology Books, 2006.

BALTAR, Carlos A. M.. **Flotação no Tratamento de Minérios**. 1 Ed. Recife, Departamento de Engenharia de Minas/UFPE, 2008.

LUZ, Adão Benvindo da Luz et al. **Tratamento de minérios**. 3 Ed. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 2002.

PERSECHINI, MARIA AUXILIADORA MUANIS. **Estratégias de Controle para o Processo de Flotação em Coluna**. 2001. 193 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2001.

PAREKH, B. K.; MILER, J. D.. **Advances in Flotation Technology**. 1 Ed. Denver, Estados Unidos, Proceedings of a symposium held at the SME Meeting, 1999.

MULAR, Andrew L.; HALBE, Doug N.; BARRAT, Derek J.. **Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings**. 1 Ed. Littleton, Estados Unidos, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc (SME), 2002, v. 2.

**Transmissor de Pressão Profibus PA**. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil2/products/LD303.asp>>. Acessado em: 15 jan, 2010.

NUNES, Tiago C.. **Treinamento Básico de Redes: Guarda Chuva Sistema Sul CVRD**. 1. ed. Belo Horizonte: ATAN Sistemas de Automação LTDA, 2005.

PEREIRA, Augusto P.; SANTOS, Leopoldo. **Arquiteturas Híbridas de Controle de Processos: do sonho do passado à realidade dos dias de hoje**. Revista Controle e Instrumentação, São Paulo, n. 82, p. 41- 45, 2003.

**ISA 5.1 Instrumentation Symbols and Society**, 1992. Disponível em: <<http://www.isa.org>>. Acessado em: 29 mar, 2010.

LYNC, A. J.; JOHNSON, N. W.; MANLAPIG, E. V. THORNE, C. G.. **Mineral and Coal Flotation Circuits: Their Simulation and Control**. 2 Ed. Amsterdam, Elsevier, 1981.