

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais - CEERMIN

MONOGRAFIA

Instrumentação e Controle no Processo de Flotação Convencional de Minério de Ferro

Aluno: Maíra Santana Diniz

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana

Junho 2013

Maíra Santana Diniz

MONOGRAFIA

Instrumentação e Controle no Processo de Flotação Convencional de Minério de Ferro

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Área de concentração: Processamento de Minérios de Ferro.

Professor orientador: Paulo Roberto de Magalhães Viana.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Junho 2013

D585i

Diniz, Maíra Santana.

Instrumentação e controle no processo de flotação convencional de minério de ferro [manuscrito] / Maíra Santana Diniz. – 2013. viii, 33 f., enc.: il.

Orientador: Paulo Roberto de Magalhães Viana.

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Bibliografia: f. 32-33.

1. Minas e recursos minerais. 2. Processamento de minérios de ferro. 3. Flotação . I. Viana, Paulo Roberto de Magalhães. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana, meu orientador, pela sua atenção durante a preparação do trabalho.

- Aos colegas de trabalho pelo auxílio.

- À família pela compreensão, dedicação e apoio incondicional.

- Aos amigos que sempre me incentivam.

- À Rísia M. Papini e à Sônia D. F. Rocha, membros da banca examinadora, pela leitura do texto e sugestões ao trabalho.

RESUMO

A mineração de ferro é uma das principais atividades econômicas do Brasil, e para atender as exigências de teor de ferro do mercado o minério precisa passar por um processo de concentração. A flotação é a técnica mais difundida para concentrar o minério de ferro que possui teores cada vez mais baixos. Esta técnica consiste em separar partículas com propriedades de superfície induzidas e possui dois requisitos básicos: as partículas devem estar liberadas e dentro de uma granulometria adequada. Para garantir que estes requisitos sejam atendidos é preciso um controle eficaz do processo. Para realizar este controle são necessários alguns instrumentos e uma estratégia de controle adequada. O processo de flotação convencional de minério de ferro é constituído por três etapas: Deslamagem, Condicionamento e Flotação e, para cada uma dessas etapas, o presente trabalho apresenta técnicas usuais de controle do processo. Com a implantação dessas técnicas é possível, além de garantir os requisitos básicos para a eficiência do processo, proporcionar um aumento da produtividade e uma diminuição dos custos e manter o processo de forma contínua e automática.

Palavras-Chave:

Instrumentação, Controle, Flotação.

ABSTRACT

Iron ore mining is one of the main economic activities of Brazil, and for achieving the specifications of iron content demanded by the market, the iron ore needs to go through a process of concentration. Flotation is the most widespread technique to concentrate iron ore that has low iron content. This technique consists of separating particles through the selective modification of their surface properties, considering that the particles must be liberated from each other within a suitable granulometric range. To ensure that the concentrate specifications and iron recovery are adjusted, a good control of the process is required. In order to perform this control some instruments and a proper control strategy are necessary. The process of conventional flotation of the iron ore consists of three steps: Desliming, conditioning and flotation, and for each of these steps, this paper presents common techniques of process control. With the implementation of these techniques it is possible to ensure the basic requirements for a high process efficiency, to increase productivity, reduce costs and keep the process continuous and automatic.

Key-word:

Instrumentation, Control, Flotation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	1
1.2 RELEVÂNCIA	2
CAPÍTULO 2 – DESENVOLVIMENTO.....	3
2.1 FLOTAÇÃO.....	3
2.1.1 Liberação	3
2.1.2 Hidrofobicidade	4
2.1.3 Diferenciação das Propriedades dos Minerais	4
2.1.4 Reagentes de Flotação.....	5
2.1.5 Células de Flotação.....	8
2.1.6 Principais variáveis de operação do processo de flotação.....	9
2.1.7 Fases de operação da flotação.....	11
2.2 INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE	12
2.2.1 Instrumentação.....	12
2.2.2 Controle de processos	17
2.2.3 Ações de Controle.....	18
2.2.4 Estratégias de Controle	19
2.2.5 Malhas de Controle	22
2.2.6 Sistemas de Controle Avançado	30
CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
CAPÍTULO 4 – BIBLIOGRAFIA	32

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CÉLULA DE FLOTAÇÃO	9
FIGURA 2.2 – ESQUEMA DE UMA MALHA DE CONTROLE ABERTA.....	18
FIGURA 2.3 – ESQUEMA DE UMA MALHA DE CONTROLE FECHADA.....	19
FIGURA 2.4 – ESQUEMA DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE POR ALIMENTAÇÃO.	20
FIGURA 2.5 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA MALHA DE CONTROLE DE NÍVEL.	23
FIGURA 2.6 – MALHA DE CONTROLE DE PRESSÃO NA BATERIA DE HIDROCICLONES.	25
FIGURA 2.7 – MALHA DE CONTROLE DE ADIÇÃO DE AMIDO GELATINIZADO.	26
FIGURA 2.8 – MALHA DE CONTROLE DE PH NOS TANQUES DE CONDICIONAMENTO.....	27
FIGURA 2.9 – MALHA DE CONTROLE DE DENSIDADE NO RECALQUE DA BOMBA.	28
FIGURA 2.10 – MALHA DE CONTROLE DE NÍVEL DA CÉLULA DE FLOTAÇÃO.	28
FIGURA 2.11 – MALHA DE CONTROLE DE ADIÇÃO DE AMINA NA CÉLULA DE FLOTAÇÃO.....	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – LETRAS DE IDENTIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS.	14
TABELA 2.2 – EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO ALFANUMÉRICA DE INSTRUMENTOS.	15
TABELA 2.3 – SÍMBOLOS PARA INSTRUMENTOS E FUNÇÕES.	16

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, a necessidade do aumento de produção para atender a sempre crescente demanda de recursos naturais não renováveis a um baixo custo, tem oferecido grandes desafios para a indústria de beneficiamento mineral e incentivado esta a desenvolver soluções cada vez melhores para concentrar, de forma economicamente viável, os minérios que possuem teores cada vez mais baixos. Como consequência, novas tecnologias são desenvolvidas para criar ou melhorar equipamentos, instrumentos e técnicas de controle para concentração de minérios.

Existem diversas técnicas de controle que podem ser adotadas, variando entre as mais simples até as mais complexas. A escolha de qual é a mais adequada depende de cada processo que, na maioria dos casos, também são diferentes devido às diversas composições dos minérios.

Dentre as formas de concentração de minério de ferro, a flotação é a que mais se destaca devido, principalmente, ao bom desempenho em processar minérios com granulometria mais fina, baixos teores e com estruturas mais complexas [WILLS, 2006]. Para manter o desempenho deste processo em um ponto de operação ótimo, faz-se necessário uma boa estratégia de controle e investimento na instrumentação necessária para a execução deste.

O controle automático dos processos industriais é cada vez mais empregado para aumentar a produtividade, baixar os custos, eliminar os erros que seriam provocados pelo elemento humano e manter automático e contínuo o processo [ARAÚJO, 2007].

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como foco apresentar algumas técnicas de instrumentação e controle, usualmente utilizadas na flotação convencional de minério de ferro, e mostrar como a automação através da instrumentação e controle pode melhorar o desempenho do processo.

1.2 Relevância

A automação industrial é vastamente empregada para melhorar o desempenho dos processos, e no contexto da indústria mineral brasileira, com profissionais de diferentes formações e níveis, é necessário apresentar o funcionamento das técnicas básicas de instrumentação e controle de forma que o leitor compreenda facilmente sem necessidade de um conhecimento prévio do assunto.

CAPÍTULO 2 – DESENVOLVIMENTO

2.1 Flotação

A flotação é um processo de concentração que separa partículas sólidas explorando diferenças nas características de superfícies entre as várias espécies de minerais presentes.

Para que a concentração do minério por flotação ocorra com sucesso, são necessários três requisitos básicos:

- Liberação dos minerais de interesse;
- Diferenciação das propriedades ou características dos minerais que se deseja separar;
- Separabilidade dinâmica.

2.1.1 Liberação

O minério proveniente da mina apresenta em sua composição vários tipos de minerais, como os minerais de ferro, hematita, magnetita e outros óxidos de ferro, que possuem valor comercial, e também os minerais que não têm valor (minerais de ganga, como o quartzo, por exemplo) [WILLS, 2006].

A concentração de minérios consiste em submeter o minério ROM (minério proveniente da mina) a uma série ordenada de operações que removam os minerais que não possuem valor comercial, promovendo a concentração dos minerais de interesse [CHAVES, 2006].

A primeira etapa na concentração de minérios consiste em fragmentação do minério, de modo a separar os minerais de interesse (minerais de ferro) dos minerais sem valor comercial (quartzo, por exemplo). Este processo denomina-se liberação. A liberação dos grãos dos diferentes minerais é obtida através de operações como britagem e moagem,

complementadas com etapas de separação por tamanho, como peneiramento e classificação em hidrociclones [WILLS, 2006].

2.1.2 Hidrofobicidade

A hidrofobicidade é uma propriedade de superfície, empregada no processo de concentração de minérios por flotação. Uma partícula hidrofóbica é uma partícula que tem pouca (ou nenhuma) afinidade com a água, isto é, a água não molha a superfície da partícula. Considerando uma polpa contendo bolhas de ar, as partículas hidrofóbicas tendem a aderir à bolha de ar, sendo arrastadas por elas. Aquelas que não aderem à bolha são denominadas hidrofílicas, pois tem afinidade com a água [WILLS, 2006].

2.1.3 Diferenciação das Propriedades dos Minerais

Para que a concentração de um minério seja possível, é necessário que os minerais que se deseja separar apresentem propriedades ou características diferentes que permitam sua separação [WILLS, 2006].

A flotação de minérios de ferro utiliza as diferenças nas características de superfície entre os minerais de interesse (minerais ricos em ferro) e os minerais de ganga, que são os minerais sem valor comercial (quartzo, por exemplo).

No processo de flotação, o minério é misturado com água em um tanque agitado, formando uma polpa sob agitação. Ao se injetar ar no interior da polpa agitada, há a formação de bolhas de ar no interior da mesma. As partículas hidrofóbicas, ao entrarem em contato com as bolhas de ar, irão aderir a elas e serão arrastadas para a superfície. As partículas hidrofílicas irão continuar na polpa em agitação. Este é o princípio de funcionamento do processo de flotação.

Como na natureza poucos minerais são naturalmente hidrofóbicos, faz-se necessário induzir esta característica nos minerais que não a possuem [VALADÃO, 2012]. Sendo assim,

as superfícies das partículas de minerais de ferro e de quartzo (principal mineral de ganga encontrado com o minério de ferro) são modificadas através da adição de reagentes químicos. As partículas de minerais de ferro permanecem hidrofílicas, e as partículas de quartzo (mineral de ganga) tornam-se hidrofóbicas.

2.1.4 Reagentes de Flotação

Para induzir uma propriedade diferenciadora são utilizados reagentes, que se constituem em uma das principais ferramentas no processo de flotação [CHAVES, 2006].

De acordo com sua função específica em um sistema de flotação os reagentes podem ser divididos em: coletores, espumantes e modificadores ou reguladores.

a) Coletores

Os coletores são compostos orgânicos, cujas moléculas possuem uma porção polar (iônica) e a outra porção apolar (não iônica). A adsorção do coletor na superfície mineral se dá pela extremidade polar do mesmo, ficando a parte não polar voltada para fora da superfície mineral. O recobrimento da partícula mineral pelo coletor confere à mesma um caráter não-polar, tornando-a hidrofóbica e portanto em condições de ser flotada [WILLS, 2006].

Ainda segundo WILLS os coletores atuam da seguinte forma: a superfície da maioria dos minerais tem características naturalmente hidrofílicas (superfícies polares) e para se tornarem flotáveis necessitam mudar seu caráter para hidrofóbicas. Portanto, há necessidade de mudanças de caráter das superfícies minerais que são obtidas através da adsorção (concentração na superfície das partículas minerais) dos coletores.

b) Espumantes

São substâncias adicionadas às polpas, nos processos de flotação, com o objetivo de produzirem espumas adequadas ao transporte das partículas minerais desejadas.

São também compostos orgânicos heteropolares, cuja estrutura é parecida com a dos coletores. A diferença reside no caráter funcional do grupo polar: o radical dos coletores é quimicamente ativo e capaz de interagir elétrica e quimicamente com a superfície do mineral a ser coletado. O espumante tem um radical liofílico de grande afinidade pela água. Esta diferença determina o comportamento dos dois grupos de reagentes: os coletores tendem a migrar para a interface sólido/gás, e os espumantes se dirigem para a interface líquido/gás [ARAUJO, 2005].

Os espumantes não devem interferir no processo de coleta das partículas minerais. Por isso são escolhidas para espumantes substâncias que não produzem íons fortes com capacidade de competir com os íons coletores pelas superfícies minerais. Os bons espumantes devem produzir espumas resistentes apenas o suficiente para transportarem as partículas coletadas. As espumas devem ser desfeitas logo após seu transbordamento nas calhas das células, quando devem se tornar uma polpa fluida [ARAUJO, 2005].

No caso específico de flotação do quartzo em minérios de ferro, a eteramina, além de ser o coletor, também atua como espumante.

c) Reguladores ou Modificadores

Esses reagentes são empregados visando tornar a ação dos coletores, e em certos casos dos espumantes, mais seletiva. As funções dos modificadores dividem-se em ativação, depressão e desativação [ARAUJO, 2005].

Os modificadores

Ativação: é um processo através do qual a superfície de uma partícula é modificada, fazendo-a reagir mais pronta e fortemente com um coletor [ARAUJO, 2005].

Desativação: é um processo através do qual um agente ativador é removido da superfície de um mineral, tornando-a menos propensa a reagir mais pronta e fortemente com um coletor [ARAUJO, 2005].

Depressão: é um processo através do qual a superfície de uma partícula é modificada no sentido de aumentar sua afinidade pela água. Normalmente são utilizados como depressores amidos, dextrinas, tanino, quebracho e ligninosulfanatos [ARAUJO, 2005].

Reguladores de pH: os reguladores de pH são utilizados para manter a acidez ou alcalinidade ideal para a ação correta dos reagentes. Podem ser ácidos orgânicos ou minerais ou bases. A soda cáustica é um dos reguladores de pH mais usados na flotação de minério de ferro e apresenta a propriedade de aumentar o pH da solução, devido à introdução de íons OH^- na solução.

Os reagentes utilizados na flotação do minério de ferro geralmente são o amido e a amina. A amina tem a função de modificar a superfície das partículas de quartzo, tornando-as hidrofóbicas (sem afinidade com água). Entretanto, se somente a amina for adicionada na polpa de minério, as partículas minerais de ferro também se tornarão hidrofóbicas, impossibilitando a concentração por flotação. Para evitar este problema, a polpa de minério é previamente misturada com solução de amido que adsorve preferencialmente nas partículas dos minerais de ferro [WILLS, 2006].

Em temperatura ambiente o amido é muito pouco solúvel em água sendo assim, o uso do amido como reagente de flotação depende da utilização de um processo de gelatinização, que consiste basicamente em expandir os grânulos de amido, aumentando sua capacidade de absorver água. Na gelatinização com soda cáustica, parte da solução de soda cáustica é absorvida pelas moléculas da suspensão de amido ocasionando sua expansão e aumentando sua capacidade de absorver água [WILLS, 2006].

O amido gelatinizado age seletivamente sobre as partículas de minerais de ferro, tornando-as hidrofílicas de modo permanente. Na etapa posterior, quando a amina for adicionada à polpa, ela irá atuar somente sobre as partículas de quartzo, tornando-as hidrofóbicas e possibilitando a flotação das partículas de quartzo [WILLS, 2006].

2.1.5 Células de Flotação

As máquinas de flotação possibilitam a separabilidade dinâmica do minério [CHAVES, 2006].

A Figura 2.1 apresenta um esquema típico de célula de flotação. A célula consiste de um tanque com agitador que mantém a polpa de minério em suspensão. O eixo do agitador é feito de estrutura tubular e, à medida que gira, cria um vácuo e o ar tende a entrar na célula através do eixo, também existem células onde o ar é bombeado para dentro das mesmas. O agitador apresenta na extremidade inferior um rotor que, de forma análoga ao rotor de uma bomba, promove a agitação e a circulação da polpa dentro da célula. Em volta do rotor, existe o estator, que é uma estrutura fixa cuja geometria e cuja superfície vazada (com vários furos) provoca a dissipação do ar na forma de pequenas bolhas, aumentando o choque das partículas com as bolhas. Com isso, as partículas hidrofóbicas aderem às bolhas e são arrastadas para cima, saindo pelas calhas de flotado da célula, na região superior. As bolhas formam uma camada de espuma na parte superior da célula. As partículas hidrofílicas se mantêm em suspensão na polpa, saindo lateralmente na abertura próxima ao fundo do tanque. A alimentação de polpa na célula é realizada na extremidade oposta à da saída, igualmente junto ao fundo do tanque [GUIMARÃES, 1995].

Em geral, na flotação de minério de ferro, o material flotado (que sai junto com a espuma) é o rejeito, isto é, o quartzo. Este tipo de flotação, onde o rejeito sai junto com a espuma, é denominada flotação reversa. Quando o material flotado é o concentrado do processo de flotação, diz-se que a flotação é do tipo direta.

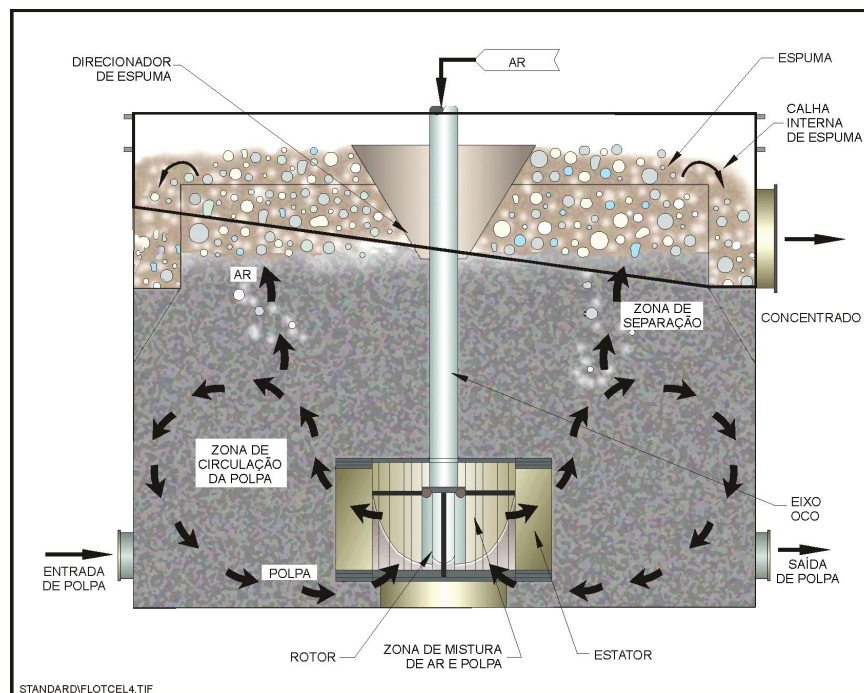


Figura 2.1 – Célula de Flotação
FONTE: Gold and Silver Metallurgy, 2012.

2.1.6 Principais variáveis de operação do processo de flotação

As principais variáveis operacionais que devem ser controladas no processo de flotação são as seguintes [WILLS, 2006]:

Condições do minério: para uma eficiente flotação, é necessário que a alimentação do minério tenha as características mais constantes possíveis quanto a sua composição mineralógica, química e granulométrica.

Condições da água: cuidados devem ser tomados com o suprimento de água, incluindo-se tratamento para evitar a presença de elementos, tais como: matéria orgânica (agente depressor e floculante de finos), sais de metais alcalinos e alcalinos terrosos (agentes ativadores) e óleos.

Tamanho das partículas: a eficiência da flotação é diretamente afetada pela granulometria do minério. De um modo geral, é muito difícil a flotação de partículas muito

finas (lamas) da ordem de poucos micrômetros, assim como é baixo o nível de recuperação de partículas mais grosseiras.

Para diminuir o tamanho do minério vindo da lavra, este é submetido a processos de cominuição, onde se obtém uma granulometria ideal, mas devido a esse processo são geradas partículas muito finas de minério denominadas lamas.

Densidade de polpa: a porcentagem de sólidos nas polpas de alimentação das unidades de flotação varia em geral de 30 a 60%. A porcentagem de sólidos influencia no dimensionamento das células industriais e na seletividade e recuperação do processo. De um modo geral, quanto mais espessa for a polpa, menores serão os volumes de células requeridas e polpas mais diluídas proporcionam melhor seletividade no processo de flotação [WILLS, 2006].

Temperatura da polpa: geralmente a flotação é conduzida à temperatura ambiente; mas, em geral, a temperatura age positivamente na velocidade das reações e na seletividade do processo [WILLS, 2006].

Dosagem de reagentes: a dosagem e a escolha dos tipos de reagentes adicionados no processo de flotação se constituem em uma das mais importantes variáveis do processo de flotação. A escolha dos reagentes e o consumo específico destes reagentes normalmente são determinados em testes de bancada [ARAUJO, 2005].

pH: o pH de uma solução expressa sua acidez ou alcalinidade (basicidade) relativa em uma escala de zero a 14. O pH expressa a atividade do íon de hidrogênio (H^+). A água pura destilada possui um pH cujo valor é sete, e é considerada neutra (nem ácida nem alcalina). Os valores de pH decrescentes, de sete a zero, indicam uma acidez crescente; os valores de pH crescentes, de sete a 14, indicam uma alcalinidade crescente. O pH pode interferir na adsorção dos reagentes, dispersão da polpa, formação de precipitados e carga elétrica das partículas [WILLS, 2006].

2.1.7 Fases de operação da flotação

O processo pode ser considerado como um conjunto das seguintes operações:

- Deslamagem:

A presença de lamas na polpa é prejudicial à flotação do minério de ferro. As lamas são partículas muito finas que, ao aderirem às partículas do minério, tendem a prejudicar a ação dos reagentes sobre as partículas, prejudicando assim o processo de flotação.

Por este motivo, a polpa de minério é submetida ao processo de deslamagem, onde as lamas são removidas da polpa de minério através da separação em hidrociclones.

- Condicionamento dos minerais com os reagentes:

Após a deslamagem, a polpa de minério necessita ser preparada para a alimentação da flotação. Em geral, o condicionamento tem duas funções principais:

- Adicionar a solução de amido gelatinizado à polpa, com a função de depressor dos minerais de ferro;
- Ajustar o pH da polpa a ser alimentada na flotação.

- Flotação:

Após o condicionamento com amido, a polpa alimenta as células de flotação juntamente com a amina que tem a função de coletor. No caso da flotação reversa do minério de ferro, o coletor age sobre os minerais de ganga. Quando as partículas minerais estão cobertas pelo coletor, as mesmas repelem a água e são atraídas pelas bolhas de ar produzidas no interior da célula de flotação. Deste modo, as partículas minerais aderem às bolhas de ar, são arrastadas para cima na célula de flotação, e saem pelo transbordo.

2.2 Instrumentação e Controle

Para poder controlar automaticamente um processo é preciso saber como ele está se comportando para poder corrigi-lo, fornecendo ou retirando dele alguma forma de energia, como por exemplo, pressão ou calor.

2.2.1 Instrumentação

Instrumentação é o ramo da engenharia que trata do projeto, fabricação, especificação, montagem, operação e manutenção dos instrumentos para medição e controle das variáveis de processo industrial [DIAS, 2012].

As informações do processo precisam ser adquiridas e transmitidas até um local acessível para serem analisadas e utilizadas, de alguma forma, para tomada de decisão sobre qualquer intervenção no processo.

As funções mais importantes dos instrumentos são: Aquisição, Transmissão, Conversão, Indicação, Registro, Controle, Alarme e Atuação.

Sensores são elementos básicos de interface entre o processo e a medição, também chamados de elementos primários, que fazem a aquisição inicial de uma variável física.

Indicadores são instrumentos que sentem a variável do processo e apresentam seu valor instantâneo, por exemplo, o manômetro.

Transmissores são elementos capazes de transformar uma determinada variável em outra, de outra natureza que, através de elementos primários, sentem as variáveis de processo, geram e transmitem um sinal padronizado para outros instrumentos como controladores e registradores.

Registradores são instrumentos de uma ou mais variáveis de processo e armazenam seus valores ao longo do tempo. Os totalizadores são um exemplo deste tipo de instrumento.

Elementos Finais de Controle são anteparos que manipulam as variáveis de processo, tais como válvulas, desviadores, resistências, variadores de velocidade, etc.

Controladores são equipamentos capazes de processar os sinais adquiridos por sensores e transmitidos por transmissores e através de funções pré-definidas (automática ou manualmente) decidem qual ação deve ser tomada para adequar o processo aos requisitos desejados e enviam sinais para atuar sobre os elementos finais de controle.

Um dos equipamentos mais difundidos para realizar as tarefas de controle industrial são os CLP (Controladores Lógicos Programáveis).

A grande maioria da instrumentação industrial se concentra nas variáveis: temperatura, pressão, nível e vazão. Outras variáveis analíticas são necessárias no processo de tratamento de minério, inclusive na flotação. Algumas destas são: pH, umidade, condutividade, densidade, posição, peso, velocidade, tamanho de partículas, etc.

Existem padrões para a representação gráfica dos instrumentos, o mais comum é o instituído pela “*International Society of Automation*” [ISA, 1992].

A Tabela 2.1 mostra como deve ser a identificação alfanumérica do instrumento e a Tabela 2.2 mostra exemplos dos códigos alfanuméricos para instrumentos e funções mais comuns e a Tabela 2.3 mostra como deve ser a representação gráfica dos instrumentos.













Tabela 2.1 – Letras de Identificação de Instrumentos.
FONTE: [ISA, 1992].

LETRAS	1º GRUPO DE LETRAS		2º GRUPO DE LETRAS		
	VARIÁVEL MEDIDA OU INICIADORA		FUNÇÃO		
	1ª LETRA	MODIFICADORA	PASSIVA OU DE INFORMAÇÃO	ATIVA OU DE SAÍDA	MODIFICADORA
A	ANÁLISE		ALARME		
B	CHAMA				
C	ESCOLHA DO USUÁRIO			CONTROLADOR	
D	ESCOLHA DO USUÁRIO	DIFERENCIAL			
E	TENSÃO		SENSOR (ELEMENTO PRIMÁRIO)		
F	VAZÃO	RAZÃO			
G	ESCOLHA DO USUÁRIO		VISOR		
H	COMANDO MANUAL				ALTO
I	CORRENTE ELÉTRICA		INDICADOR		
J	POTÊNCIA	VARREDORA OU SELEÇÃO MANUAL			
K	TEMPO OU TEMPORIZAÇÃO	TAXA DE VARIAÇÃO COM O TEMPO		ESTAÇÃO DE CONTROLE	
L	NÍVEL		LÂMPADA PILOTO		BAIXO
M	ESCOLHA DO USUÁRIO	INSTANTÂNEO			MÉDIO OU INTERMEDIÁRIO
N	ESCOLHA DO USUÁRIO		ESCOLHA DO USUÁRIO	ESCOLHA DO USUÁRIO	ESCOLHA DO USUÁRIO
O	ESCOLHA DO USUÁRIO		ORIFÍCIO DE RESTRIÇÃO		
P	PRESSÃO, VÁCUO		CONEXÃO PARA PONTO DE TESTE		
Q	QUANTIDADE OU EVENTO	INTEGRAÇÃO OU TOTALIZAÇÃO			
R	RADIAÇÃO		REGISTRADOR OU IMPRESSORA		
S	VELOCIDADE OU FREQUÊNCIA	SEGURANÇA		CHAVE	
T	TEMPERATURA			TRANSMISSOR	
U	MULTIVARIÁVEL		MULTIFUNÇÃO	MULTIFUNÇÃO	MULTIFUNÇÃO
V	VIBRAÇÃO, ANÁLISE MECÂNICA			VÁLVULA OU DEFLETOR (DAMPER OU LOUVER)	
W	PESO OU FORÇA		POÇO OU PONTA DE PROVA		
X	NÃO CLASSIFICADA	EIXO X	NÃO CLASSIFICADA	NÃO CLASSIFICADA	NÃO CLASSIFICADA
Y	ESTADO, PRESENÇA OU SEQUÊNCIA DE EVENTOS	EIXO Y		RELÉ, RELÉ DE COMPUTAÇÃO, CONVERSOR OU SOLENÓIDES	
Z	POSIÇÃO	EIXO Z		ELEMENTO FINAL DE CONTROLE N/CLASSIFICADO	

Tabela 2.2 – Exemplo de representação alfanumérica de instrumentos.

	Pressão	Vazão	Nível	Densidade	pH	Temperatura
Sensor	PE	FE	LE	DE	AE	TE
Transmissor	PT ou PIT (transmissor com indicador local) ou PDT/PDIT para de pressão diferencial	FT ou FIT (transmissor com indicador local)	LT ou LIT (transmissor com indicador local)	DT ou DIT (transmissor com indicador local)	AT ou AIT (transmissor com indicador local)	TT ouTIT (transmissor com indicador local)
Indicador	PI	FI	LI	DI	AI	TI
Controlador	PIC	FIC	LIC	DIC	AIC	TIC
Chave	PSH (chave de pressão alta) ou PSL (chave de pressão baixa)	FSH (chave de vazão alta) ou PSL (chave de vazão baixa)	LSH (chave de nível alto) ou LSL (chave de nível baixo)	DSH ou DSL	ASH ou ASL	TSH ou TSL
Válvulas	PV	FV	LV	DV	AV	-
Válvulas de Controle	PCV	FCV	LCV	DCV	ACV	-
Válvulas de Segurança	PSV	FSV	LSV	-	-	-

Tabela 2.3 – Símbolos para Instrumentos e Funções.
FONTE: [ISA, 1992].

TIPO \ LOCALIZAÇÃO	LOCAÇÃO PRINCIPAL NORMALMENTE ACESSÍVEL AO OPERADOR (1)	MONTADO NO CAMPO	LOCAÇÃO AUXILIAR NORMALMENTE ACESSÍVEL AO OPERADOR (1) (2)
INSTRUMENTOS DISCRETOS	 MD 1(3)		
INSTRUMENTOS COMPARTILHADOS	 CO 2(3)		
COMPUTADOR DE PROCESSO			
CONTROLADOR PROGRAMÁVEL			

NOTA:

(1) LOCAÇÃO PRINCIPAL CORRESPONDE NORMALMENTE, PARA INSTRUMENTOS DISCRETOS, AO PAINEL CENTRAL ANALOGAMENTE LOCAÇÃO AUXILIAR CORRESPONDE AO PAINEL LOCAL OU CASA DE CONTROLE DEDICADA A UM CONJUNTO DE FUNÇÕES ESPECÍFICAS DE UM SISTEMA DE PROCESSO.

(2) OS DISPOSITIVOS OU FUNÇÕES PROGRAMADAS, NORMALMENTE INACESSÍVEIS OU "ATRÁS DO PAINEL" DEVEM SER DESENHADOS USANDO O MESMO SÍMBOLO MAS COM A LINHA HORIZONTAL CENTRAL TRACEJADA.

(3) QUANDO NECESSÁRIO ESPECIFICAR A LOCALIZAÇÃO DO INSTRUMENTO OU FUNÇÃO PROGRAMADA PODEM SER UTILIZADAS ABREVIATURAS JUNTO AO SÍMBOLO GRÁFICO, TAIS COMO:

(A) MD 1: MÓDULO Nº 1.
(B) CO 2: CONSOLE DE OPERAÇÃO Nº 2.

2.2.2 Controle de processos

Um sistema de controle é formado por uma série de instrumentos e mecanismos de controle, que se comunicam através de sinais (elétricos, pneumáticos, hidráulicos...), e que estão interligados sob a forma de malha de controle.

Para controlar um processo, é necessário ter conhecimento dos seguintes elementos:

- Variável de processo, ou “*process variable*” (PV), que é a variável que se deseja controlar;
- Variável controlada, ou “*control variable*” (CV), que é a variável que será acionada para promover o controle do sistema;
- Valor desejado, ou “*set point*” (SP), que é o valor de referência estabelecido para o processo.

A ação de controle é realizada através de cálculos matemáticos que utilizam equações para os diversos modos de controle.

Para realizar a correção e estabelecer o controle dos processos, inicialmente é gerado o erro através da comparação entre o valor medido (PV) e o valor desejado (SP). Determinado o erro, é aplicada a equação conforme o modo de controle selecionado e calculada a saída de controle que irá manipular o elemento final de controle para corrigir os desvios apresentados.

Os principais distúrbios que os controladores devem manipular se referem à:

- Distúrbios de demanda – quando há variação na grandeza do processo (grandeza controlada), decorrente de oscilações aleatórias (imprevisíveis) e normais dos processos produtivos. Este distúrbio é detectado pelos instrumentos medidores dos processos [OGATA, 2011].

- Mudanças de “*set point*” – quando por necessidade de alteração da característica controlada, deve-se mudar o valor alvo da variável controlada.

Neste caso é alterado o valor do SP no controlador [OGATA, 2011].

No processo, existem distúrbios que tendem a afastar as variáveis de processo do valor desejado. Assim, a função do sistema de controle é ajustar a variável controlada, de forma a manter a variável de processo no valor desejado, apesar da existência de eventuais distúrbios.

O Valor Desejado (SP) pode ser definido de duas maneiras:

- Manual: Valor fixo definido pelo operador.
- Automática: Valor definido automaticamente em função de alguma variável ou condição de processo.

2.2.3 Ações de Controle

Com relação ao tipo de ação de controle, as malhas podem ser divididas basicamente em dois tipos [DORF, 2009]:

Malha de Controle Aberta:

É aquela em que a informação sobre a variável de processo não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as variações no processo.

Normalmente este tipo de malha é utilizado para conhecer a dinâmica do processo. A

Figura 2.2 ilustra esta ação de controle.

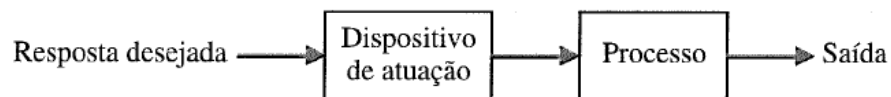


Figura 2.2 – Esquema de uma malha de controle aberta.
FONTE: DORF, 2009.

Malha de Controle Fechada:

Tem como função manter a variável de processo dentro dos limites estabelecidos utilizando como artifício para isso atuar em uma variável controlada que influencie no valor da variável de processo. A Figura 2.3 ilustra esta ação de controle.

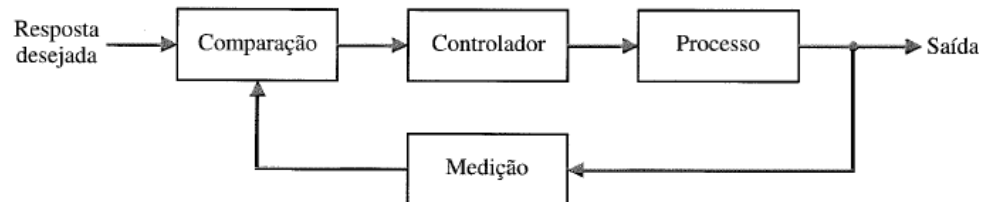


Figura 2.3 – Esquema de uma malha de controle Fechada.
FONTE: DORF, 2009.

As malhas de controle poderão ter ação de controle direta ou reversa de acordo com o indicado abaixo:

- Diretas: São as malhas de controle que possuem a correção da saída de controle analógica diretamente proporcional ao incremento ou decremento do erro calculado.
- Inversas: São as malhas de controle que possuem a correção da saída de controle analógica inversamente proporcional ao incremento ou decremento do erro calculado.

2.2.4 Estratégias de Controle

Um estudo detalhado da teoria de controle exige a aplicação de ferramentas matemáticas que possibilitam estabelecer um modelo para cada processo. A análise da resposta dos sistemas a determinadas excitações conduz normalmente a resolução de equações diferenciais de primeira ordem ou de ordem superior, dependendo da classificação do sistema [DORF, 2009].

Independente da modelagem matemática das malhas de controle, as mesmas podem ser classificadas de acordo com a estratégia de controle definida.

- Controle por Alimentação (“*Feedback*”)

Utiliza o valor do desvio do valor da variável de processo em relação ao valor desejado (erro) para efetuar a ação corretiva.

São instalados instrumentos para medir as variáveis de processo que transmitem aos controladores os valores medidos, que compara com o valor desejado e calcula com base no erro os valores do sinal que deve ser enviado a variável controlada.

O ponto forte do controle por realimentação é que não se necessita conhecer antecipadamente os distúrbios que afetam o processo, e também não estabelecem as relações entre os distúrbios e seus efeitos sobre o processo [OGATA, 2011].

Essa é a estratégia de controle mais utilizada e pode ser definida pela Figura 2.4.

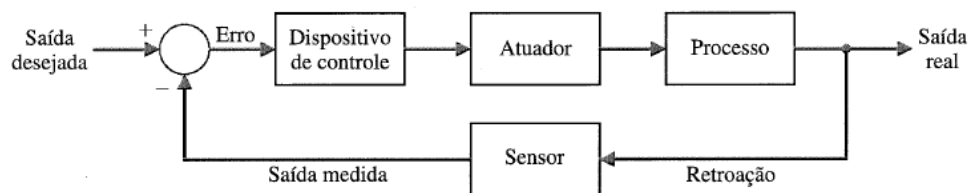


Figura 2.4 – Esquema da estratégia de Controle por Alimentação.
FONTE: DORF, 2009.

- Controle por Antecipação (“*Feedforward*”)

O controle por antecipação responde diretamente aos distúrbios, proporcionando um controle antecipado.

Os instrumentos medem os valores dos distúrbios e o controlador calcula o sinal de correção em função das cargas e do valor desejado. Assim, alterações nas

condições de entrada do processo causam alteração no sinal de controle antes que haja mudança na variável de processo.

- Controle Liga-Desliga

Este controle é normalmente empregado em processos que podem admitir certa oscilação contínua da variável de processo em torno do valor desejado.

A saída de um controlador liga-desliga muda de ligada para desligada, ou vice-versa, à medida que o sinal de erro passa pelo zero, ou seja, quando a variável passa pelo ponto de ajuste. Os controles liga-desliga são largamente utilizados na indústria, especialmente em sistemas de segurança para proteção de equipamentos, e em processos que admitem malhas de menor importância [ARAÚJO, 2007].

É comum, nestas aplicações, a adição de uma zona morta ao controlador, que diminui a frequência de oscilação e o desgaste do elemento final de controle.

- Controle em Cascata

Esta estratégia de controle é utilizada em situações em que uma única malha de controle de realimentação negativa não tem a precisão e a qualidade necessárias em determinadas situações, em função da importância do processo que está sendo controlado [OGATA, 2011].

Aplica-se o controle em cascata quando os efeitos dos distúrbios sobre a variável de controle afetam a variável de processo. A função principal do controle em cascata é compensar os efeitos das perturbações que ocorrem na variável de controle.

- Controle em Razão

Alguns processos industriais necessitam manter duas ou mais vazões numa determinada proporção. O controle de razão constitui-se num caso elementar de controle por antecipação [ARAÚJO, 2007].

Este tipo de controle encontra aplicação quase que exclusivamente em ajuste de vazões. Considere manter certa razão R de um produto B para um produto A :

$$R = B/A.$$

Existem duas maneiras de processar essa razão. O método mais comum considera uma malha de controle cujo valor desejado é dado por $B = R \times A$.

O segundo modo de manter a razão entre essas duas variáveis é calcular R por medição individual de cada fluxo. Qualquer variação entre as duas vazões é detectada pelo controlador que manipula uma das vazões para manter o valor de R [ARAÚJO, 2007].

- Controle Seletivo

Para cada variável de processo em um sistema de controle, há pelo menos uma variável controlada. Em muitos sistemas, porém, a quantidade de variáveis de processo supera a de variáveis manipuladas. Nestes casos, o sistema deve decidir como compartilhar as variáveis controladas em função das necessidades do processo.

- Controle em Faixa Dividida (“*Split-Range*”)

Este tipo de controle envolve normalmente duas válvulas de controle operadas pelo mesmo controlador e aplica-se tanto a controle de uma dada variável ligada ao processo, ou em processos em que se impõem limites de segurança [OGATA, 2011].

O controle em faixa dividida pode ser utilizado quando uma válvula não tem a capacidade de vazão solicitada pelo processo. Nesse caso são utilizadas duas válvulas em “*split-range*”.

2.2.5 Malhas de Controle

As malhas de controle consistem em sistemas concebidos para realizar o controle de determinadas variáveis de processo de forma automática.

O emprego das malhas de controle depende da definição do objetivo (qual ou quais variáveis principais se deseja controlar) e da estratégia de controle (como controlar a variável) [OGATA, 2011]. A variável de processo que se deseja controlar pode ser, por exemplo, granulometria do minério processado, vazão (de sólidos, líquidos, polpas), temperatura, pressão ou densidade.

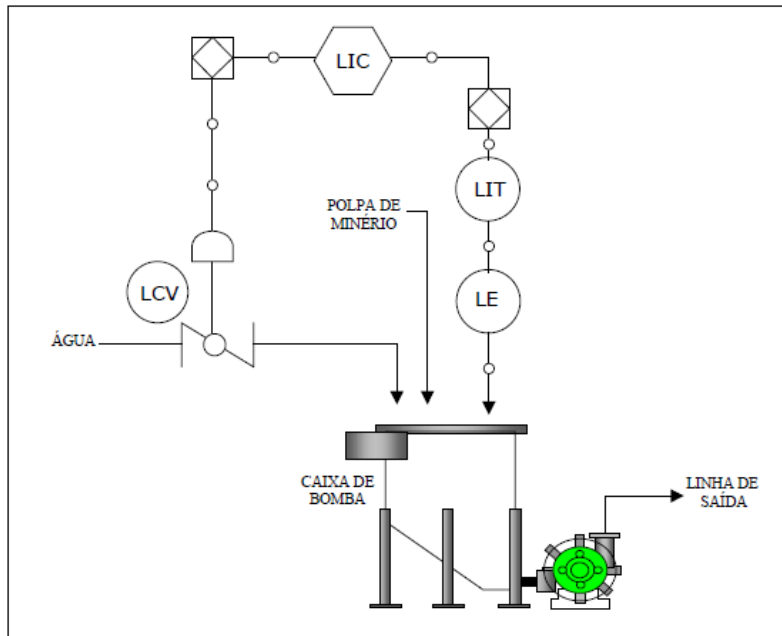


Figura 2.5 – Representação gráfica de uma malha de controle de nível.

A Figura 2.5 representa a operação de uma bomba que recebe a alimentação de polpa de minério na caixa e realiza o bombeamento do material para outro ponto.

O objetivo de controle da operação da bomba é manter o nível de polpa constante na caixa da bomba através da adição de água. Nesta malha de controle, tem-se:

Variável de controle: nível da caixa da bomba;

Variável controlada ou manipulada: adição de água na caixa da bomba.

O nível atual da caixa é medido através do sensor de nível (LE). O indicador transmissor de nível (LIT) envia a informação do nível atual da caixa para o indicador controlador de nível (LIC).

O indicador controlador de nível (LIC) compara o nível atual com o “*set point*” e, em função do desvio encontrado, o LIC gera um sinal de saída para corrigir o valor medido.

O sinal de saída do LIC passa por um conversor, que converte o sinal que sai do LIC (sinal de rede) para um sinal pneumático que irá acionar a válvula de controle de nível (LCV), abrindo ou fechando conforme necessário. Por exemplo, se o nível estiver muito baixo, a válvula LCV irá abrir para elevar o nível, aproximando do “*set point*”. Ao contrário, se o nível estiver muito alto, a válvula irá fechar para reduzir o nível da caixa.

A abertura e fechamento da válvula são proporcionais ao desvio entre o “*set point*” e o valor medido do nível.

Serão apresentadas a seguir as malhas de controle típicas no processo de flotação de minério de ferro.

- Deslamagem

Pressão nas baterias de hidrociclones:

Para uma operação satisfatória os ciclones devem manter a sua pressão em um valor adequado. A malha de controle de pressão, ilustrada na figura 2.6, controla a pressão aumentando ou diminuindo a quantidade de hidrociclones em operação na bateria, de modo a atingir e manter o “*set point*” de pressão. Esse controle deverá ser feito através da abertura e fechamento das válvulas guilhotinas (PCV) fornecidas com o equipamento de acordo com a medição de pressão realizada pelo PIT (transmissor indicador de pressão).

Essa malha de controle é do tipo Liga-Desliga.

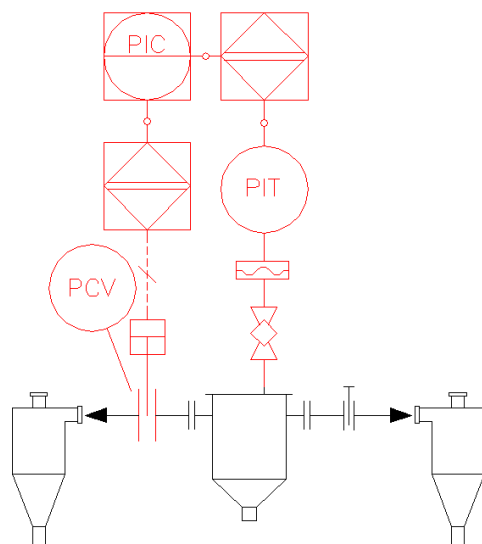


Figura 2.6 – Malha de controle de pressão na bateria de hidrociclones.

Pressões elevadas tendem a aumentar a fração de partículas finas no “*underflow*”, podendo contaminar a alimentação da flotação com lamas, o que é indesejável.

- Condicionamento

Dosagem de amido gelatinizado (depressor dos minerais de ferro):

As válvulas de controle de vazão de amido (FCV) abrem ou fecham de modo a aumentar ou diminuir a vazão, medida pelo FE/FIT, de solução de amido em função do “*set point*”, que é calculado com base na massa de alimentação nova de polpa, de modo a manter a dosagem especificada. Para isso, é necessária a utilização de dois instrumentos na linha de adição de polpa, um densímetro (DE/DIT), e um medidor de vazão volumétrico (FE/FIT). A polpa de minério consiste no material fluido resultante da mistura de minério com água. A densidade de polpa, por sua vez, consiste na razão massa de polpa por unidade de volume. A densidade é normalmente expressa em toneladas por metro cúbico (t/m³). Multiplicando-se a vazão volumétrica (m³/h) pela densidade da polpa (t/m³), tem-se a massa de alimentação nova (t/h), utilizada como base para o “*set point*” de vazão de amido.

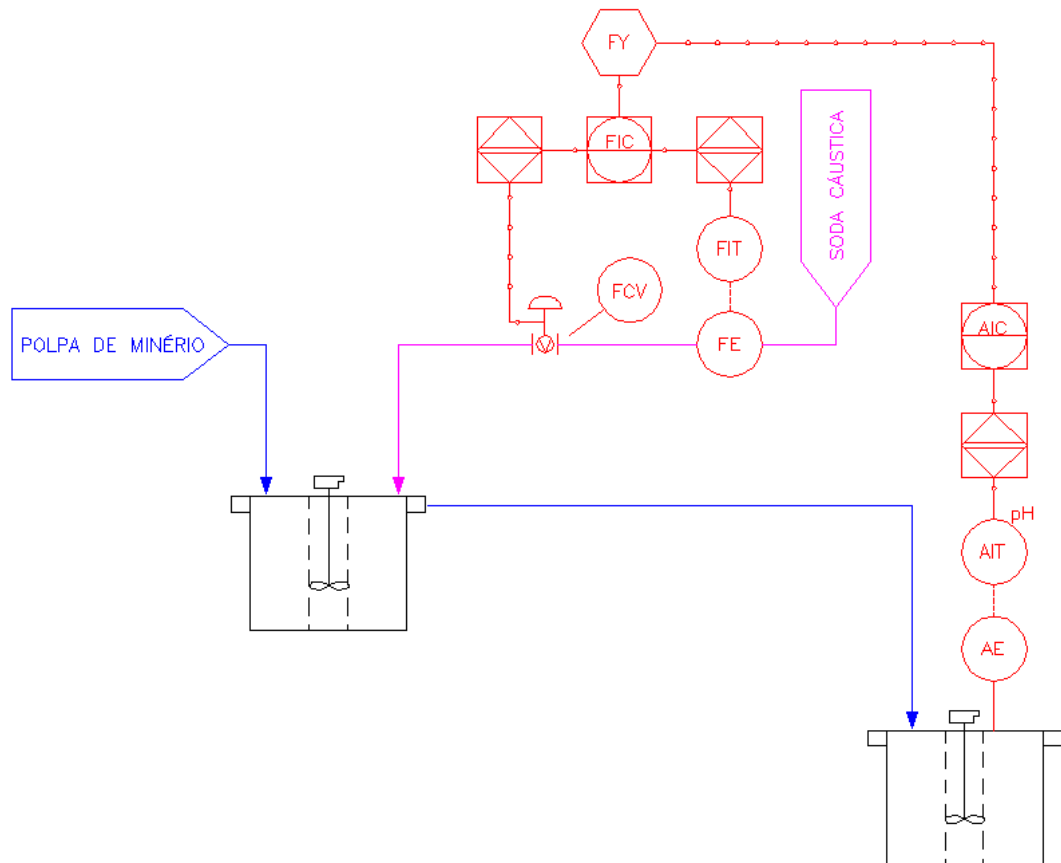


Figura 2.8 – Malha de controle de pH nos tanques de condicionamento.

A falta de controle de pH na flotação afeta o desempenho da mesma, pois altera o pH ideal para a atuação dos reagentes de flotação. 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.

Densidade no recalque das bombas de alimentação da flotação:

A malha de controle de densidade modula a abertura ou fechamento da válvula (PCV) de adição de água na caixa da bomba, de modo a atingir “set point” de densidade no recalque da bomba, que é comprovado através de medição pelo densímetro (DE/DIT), Figura 2.9.

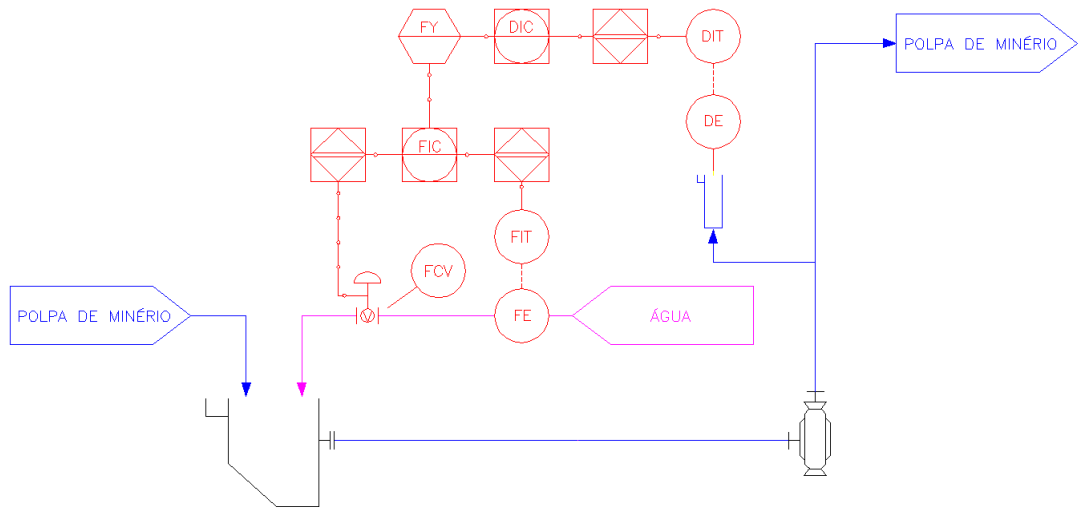


Figura 2.9 – Malha de controle de densidade no recalque da bomba.

Polpas excessivamente densas podem reduzir a velocidade de flotação por insuficiência de ar, além de arrastar minerais de ferro para o rejeito.

- Flotação

Nível dos bancos de célula de flotação:

A malha de controle modula a abertura ou o fechamento das válvulas dardo (LCV) de controle de nível na descarga do banco de células, Figura 2.10, de modo a atingir o “*set point*” de nível na célula, que é medido pelo medidor de nível (LE/LIT).

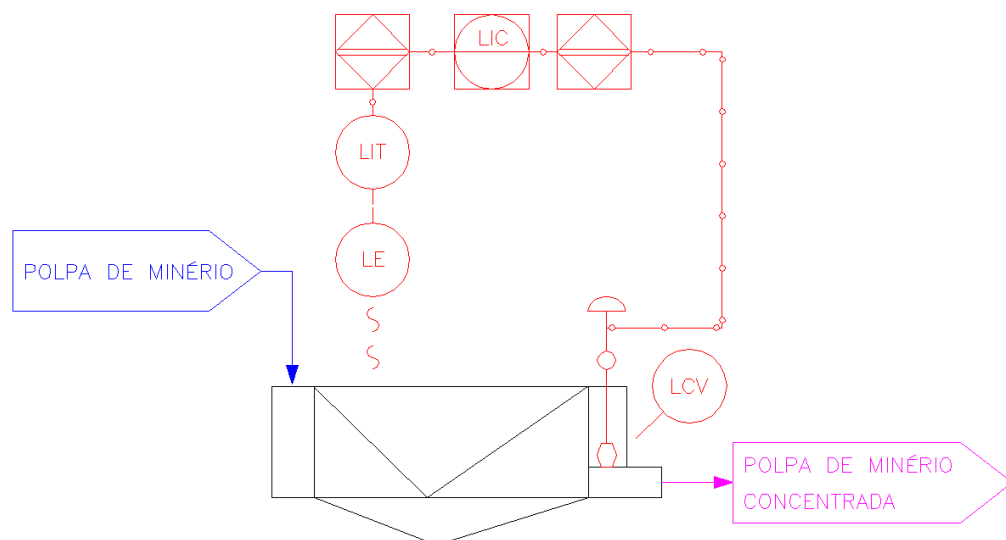


Figura 2.10 – Malha de controle de nível da célula de flotação.

Camada de espuma muito pequena implica na total remoção da espuma na calha do “*overflow*” e, eventualmente, pouca quantidade de polpa. Camada de espuma muito espessa possibilita a contaminação do concentrado (afundado) com quartzo.

Dosagem de amina (coletor de quartzo) nas células de flotação:

As válvulas de controle de vazão de amina (FCV) abrem ou fecham de modo a aumentar ou diminuir a vazão, medida pelo FE/FIT, de solução de amina em função do “*set point*”, que é calculado com base na massa de alimentação nova de polpa, de modo a manter a dosagem especificada. Assim como na adição de amido, o “*set point*” é obtido através da densidade e vazão da polpa que alimenta a célula, Figura 2.11.

Essa malha de controle é do tipo Controle em Razão.

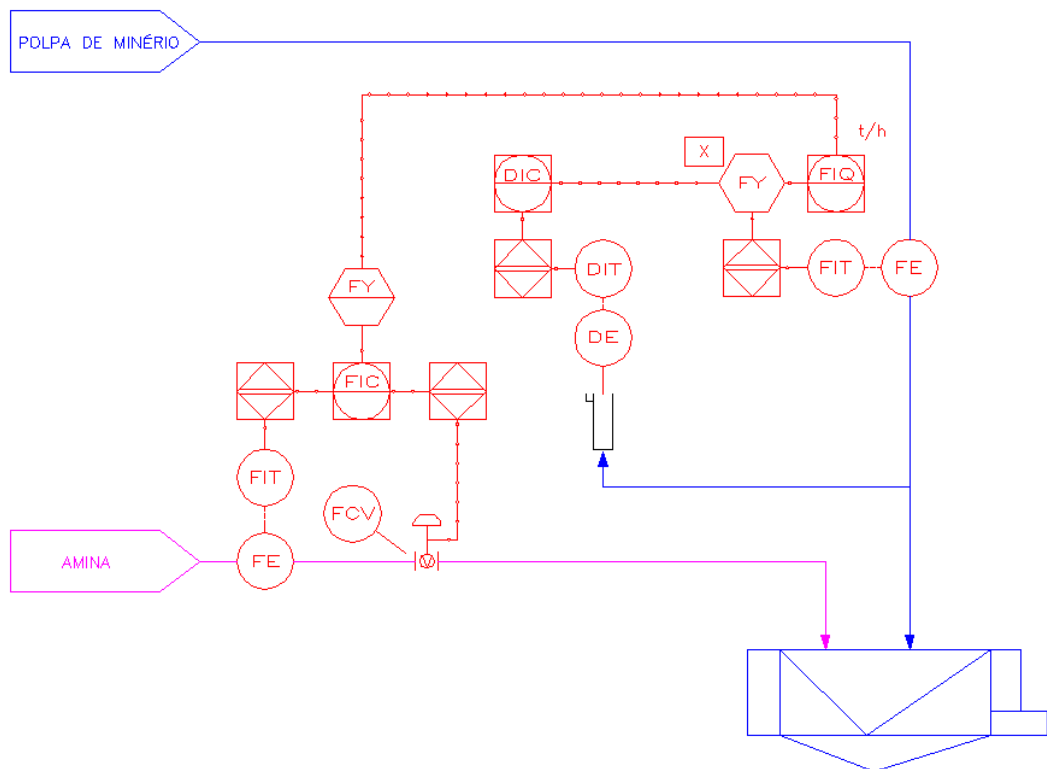


Figura 2.11 – Malha de controle de adição de amina na célula de flotação.

A falta de controle na dosagem de solução de amina afeta a eficiência de coleta da ganga (quartzo) e portando afeta a eficiência da flotação.

2.2.6 Sistemas de Controle Avançado

O controle avançado de processos vem sendo difundido em vários segmentos industriais por proporcionar um controle fino do processo, melhorando muito a qualidade do produto. Esse tipo de controle baseia-se, normalmente, em fundamentos de inteligência artificial, que permite que o sistema aprenda, com o passar do tempo, como o processo se comporta diante das mais variadas interferências e sob as diversas ações de controle possíveis, sendo assim ele consegue definir automaticamente um ponto ótimo de operação ou fazer análises com uma boa precisão de variáveis de processo [OGATA, 2011].

No processo de flotação o uso mais comum deste tipo de controle é o sistema de análise por imagem para medição da velocidade e nível de espuma e controle de adição de espumante.

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 justificando assim os investimentos necessários.

CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A automação industrial está em constante evolução para atender às necessidades do processo de flotação, pois sem um devido controle não é possível atingir qualidade e preços competitivos para os concentrados gerados na flotação de minério de ferro.

Como foi apresentado, existem várias técnicas de controle e uma enorme gama de instrumentos. Escolher qual a melhor estratégia de controle depende de um bom conhecimento do processo e uma vez implantado um sistema de controle é necessário adotar boas práticas de operação e manutenção para garantir o bom funcionamento da planta.

Em resumo, este trabalho apresenta, de forma sucinta, como a automação esta presente no processo de flotação de forma a facilitar a compreensão do funcionamento da flotação de minério de ferro e a elaboração de estratégias de controle.

CAPÍTULO 4 – BIBLIOGRAFIA

[ARAUJO, 2005] ARAUJO, A.C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A.E.C., **Reagents in Iron Ores Flotation**, Minerals Engineering, Vol. 18, 2005.

[ARAÚJO, 2007] ARAÚJO, M. L. P.; TOBIAS, R. C., **Curso Básico de Instrumentação Industrial**. Notas de Aula.

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

[DIAS, 2012] DIAS, C. A., **Técnicas Avançadas de instrumentação e Controle de Processos Industriais - Ênfase em Petróleo e Gás**, 2 Ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2012.

[DORF, 2009] DORF, R. C.; BISHOP, R. H., **Sistemas de Controle Modernos**, 11 Ed. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2009.

[GOLD, 2012] Gold and Silver Metallurgy. **Home-Page**. Disponível em <<http://www.goldandsilvermetallurgy.com>> Acesso em 05/12/2012.

[GUIMARÃES, 1995] GUIMARÃES, R.C; PERES, A. E. C., **Máquinas de Flotação**. Relatório técnico BT/PMI/046. Escola Politécnica - DEM - USP, 1995.

[ISA, 1992] ISA 5.1 Instrumentation Symbols and Society, 1992. **Home-Page**. Disponível em <<http://www.isa.org>> Acesso em 05/12/2012.

[OGATA, 2011] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 5 Ed, São Paulo, Editora Pearson, 2011.

[VALADÃO, 2012] VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C., **Introdução ao Tratamento de Minério**. 1 Ed. Minas Gerais, Editora UFMG, 2012.

[WILLS, 2006] 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.