

Instrumentação de uma Coluna de Flotação Piloto para Desenvolvimento de Técnicas de Controle Avançadas

**Maria Auxiliadora Muanis Persechini
Fábio Gonçalves Jota
Maria Lúcia Magalhães de Oliveira
Antônio Eduardo Clark Peres**

Presidência da República

FERNANDO HENRIQUE CARDOSO

MARCO ANTÔNIO MACIEL

Vice-presidente

Ministério da Ciência e Tecnologia

RONALDO MOTA SARDENBERG

CARLOS AMÉRICO PACHECO

Secretário Executivo

JOÃO E. STEINER

Secretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

GILDO DE ARAÚJO SÁ CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE

Diretor

FERNANDO A. FREITAS LINS

Coordenação de Inovação Tecnológica (CTEC)

ROBERTO C. VILLAS-BÔAS

Coordenação de Desenvolvimento Sustentável (CODS)

CARLOS CÉSAR PEITER

Coordenação de Apoio a Pequenas e Médias Empresas (CPME)

AUGUSTO WAGNER PADILHA MARTINS

Coordenação de Planejamento e Gestão Operacional (CPGO)

ARNALDO ALCOVER NETO

Coordenação de Análises Mineraias (COAM)

COSME ANTÔNIO MORAES REGLY

Coordenação de Administração (COAD)

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

Instrumentação de uma coluna de flotação piloto para desenvolvimento de técnicas de controle avançadas

MARIA AUXILIADORA MUANIS PERSECHIN

Engenheira Eletricista, Doutora em Engenharia Elétrica pela UFMG, Consultora.

FÁBIO GONÇALVES JOTA

Engenheiro Eletrônico e de Telecomunicações, PhD. em Engenharia Eletrônica pela University of Oxford, Professor do Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG.

MARIA LÚCIA MAGALHÃES DE OLIVEIRA

Engenheira Operacional Mecânico, Doutora em Engenharia Química pela UNICAMP, Pesquisadora do CDTN-CNEN.

ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES

Engenheiro Metalurgista, PhD. em Engenharia Mineral pela University of British Columbia, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

MARIO VALENTE POSSA

Editor

ROBERTO DE BARROS EMERY TRINDADE

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Arnaldo Alcover Neto, Fernando Freitas Lins, João Alves Sampaio, Reiner Neumann, Ronaldo Luiz Correia dos Santos, Achilles Junqueira Bourdot Dutra (UFRJ), Antonio E. Clark Peres (UFMG), Cláudio Schneider (University of Utah), José Aury de Aquino (CDTN), José Farias de Oliveira (UFRJ), Lino Rodrigues de Freitas (CVRD), Luciano Tadeu da Silva Ramos (CVRD), Mário Rui Machado Leite (IGM-Portugal), Maurício Leonardo Torem (PUC-Rio)

A Série Tecnologia Mineral publica trabalhos na área minero-metalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es)

Jackson de Figueiredo Neto **COORDENAÇÃO EDITORIAL**
Dayse Lúcia Moraes Lima **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA**
Vera Lúcia Souza **CAPA**

Instrumentação de uma coluna de flotação piloto para desenvolvimento de técnicas de controle avançadas/Maria Auxiliadora Persechini et al. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

42 p. (Série Tecnologia Mineral, 80)

1. Flotação em coluna. 2. Beneficiamento de minério. I. Persechini, Maria Auxiliadora. II. Centro de Tecnologia Mineral. III. Série

ISBN 85-7227-159-7

ISSN 0103-7382

CDD 622.752

Apresentação

Em sistemas industriais é indispensável, para aplicação de métodos de controle, a perfeita identificação dos objetivos e as variáveis que devem ser consideradas e quais devem ser controladas.

No processo de flotação, para a estabilidade do processo, é muito importante controlar a altura da camada de espuma e o holdup de ar na zona de coleta.

Para alcançar este objetivo, torna-se de suma importância a definição de como as variáveis serão medidas, a especificação da instrumentação de medição e o controle das referidas medidas.

Neste trabalho, os autores descrevem a especificação da instrumentação, permitindo uma análise do comportamento dinâmico das variáveis e a aplicação de técnicas de controle avançadas. Outro aspecto importante, apresentado pelos autores no trabalho, é a análise da precisão dos valores medidos.

Os autores, no texto do trabalho apresentado, analisam os seguintes tópicos: Descrição do processo, Instrumentação para uma coluna piloto e Análise de erros dos métodos de cálculo.

Nas Conclusões, os autores esperam que a instrumentação descrita no trabalho permita um estudo mais aprofundado do comportamento das variáveis, como, por exemplo, definir o grau de interação dessas variáveis e pares apropriados de variáveis controladas e manipuladas, que serão a base para a simulação e aplicação de técnicas avançadas de controle

Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque
Diretor do CETEM

Sumário

Resumo	9
Abstract	10
1. Introdução	11
2. Descrição do processo	13
2.1. Variáveis manipuladas	15
2.2. Variáveis controladas	16
3. Instrumentação para uma coluna piloto	24
3.1. Detalhamento da instrumentação especificada	26
4. Análise de erros dos métodos de cálculo	29
4.1. Erros associados aos medidores de pressão	29
4.2. Erros associados ao cálculo do <i>holdup</i> de ar na zona de recuperação devido à estimativa do valor da densidade de polpa	33
4.3. Erros associados ao cálculo da altura da interface devido à imprecisão da estimativa do valor da densidade da espuma	34
4.4. Análise dos resultados	35
5. Conclusões	38
6.Referências bibliográficas	40

Nomenclatura

H	altura
J	velocidade superficial
P	pressão
Q	vazão
g	aceleração da gravidade
h	altura camada de espuma
Δ	diferença
δ	erro
ε	<i>holdup</i>
ρ	densidade
Φ	fração volumétrica

Subscritos

B	<i>bias</i>
C	fração flotada
F	alimentação
T	fração não-flotada
W	água de lavagem
CZ	zona de coleta
\tilde{Z}	zona de limpeza
g	ar
l	líquido
s	sólido
t	altura total

Resumo

O principal objetivo de controle para uma coluna de flotação é garantir o rendimento metalúrgico do processo, traduzido pelo teor e pela recuperação do mineral de interesse no concentrado. Entretanto, essas variáveis não são normalmente medidas diretamente, sendo requeridas análises químicas de amostras. A estratégia usada para alcançar o objetivo principal é manter a coluna em condição operacional estável, controlando as principais variáveis operacionais, ou seja, a altura da camada de espuma e o holdup de ar na zona de coleta. Neste artigo, são analisadas as variáveis operacionais sob o ponto de vista de controle, classificando-as entre controladas e manipuladas, e determinando a influência de cada uma delas na dinâmica do processo. Com base nessa análise, é definida a instrumentação necessária para o desenvolvimento de estratégias avançadas de controle e feito um estudo da propagação dos erros de medição. A instrumentação para uma coluna de flotação piloto possui características próprias para suportar os diferentes tipos de minérios e condições operacionais a que a coluna é submetida. Além disso, as baixas vazões e o reduzido diâmetro das tubulações precisam ser considerados para especificar o tipo de instrumento adequado. Também é necessário definir a precisão e a faixa de operação dos instrumentos, especialmente aqueles que são de fundamental importância para a implementação de técnicas de controle mais elaboradas.

Palavras-chave: coluna de flotação; instrumentação de processos; propagação de erros.

Abstract

The main objective in controlling a flotation column is to obtain the desired metallurgical performance of the circuit, expressed by the grade and the recovery of the valuable mineral in the concentrate. However, these variables, normally, are not measured directly, in which case, chemical analysis of samples are required. The strategy used to reach this goal is to keep the column in stable operating conditions, by controlling its main variables, namely, the froth layer height and the air holdup in the collection zone. In the present paper, the operating variables are analysed from the control techniques viewpoint: they are classified either as controlled or manipulated and their influence on the process dynamics is determined. Based on this analysis, the required instrumentation for developing advanced control techniques is defined and an error propagation study is performed. The instrumentation for a pilot flotation column presents peculiarities to stand different kinds of ores and operating conditions to which the column is submitted. Furthermore, the low flowrates and the small diameters of the piping system must be taken into consideration for specifying the suitable type of instrument. It is also necessary to define the accuracy and range of operation of the instruments, specially those which are of fundamental importance for accomplishing more elaborated control techniques.

Key words: column flotation; process instrumentation; error propagation.

1. Introdução

Para a aplicação de técnicas de controle em sistemas industriais é necessário, em primeiro lugar, identificar os objetivos de controle e quais variáveis devem ser manipuladas e quais devem ser controladas. Como o processo de flotação em coluna é tipicamente multivariável, com forte interação entre suas variáveis, qualquer estratégia de controle que pretenda regular simultaneamente mais de uma variável desse processo precisa levar em conta essa interação.

McKee (1991), abordando o processo de flotação, argumenta que o objetivo do controle é otimizar o desempenho metalúrgico, mas como esse é um objetivo muito genérico, existem três objetivos básicos que necessitam ser atingidos:

- 1) estabilizar o processo minimizando a frequência e a severidade de operações erráticas;
- 2) alcançar os valores nominais de referência para a recuperação e o teor do mineral de interesse no concentrado;
- 3) maximizar o desempenho econômico do processo.

Apesar de objetivos econômicos serem tratados como meta primordial em instalações industriais, existe uma ordem em que os objetivos básicos devem ser alcançados. Primeiro, é preciso estabilizar o processo, para, em seguida, atingir os valores de referência da recuperação e do teor, e, finalmente, atingir os critérios econômicos (McKee, 1991). Essa ordem se justifica de uma forma muito clara, dado que é difícil otimizar um processo, além de possuir restrições operacionais, sofre problemas de instabilidade.

Para estabilizar o processo de flotação, é necessário pelo menos controlar a altura da camada de espuma e o *holdup* de ar na zona de coleta. Para isso, é preciso definir como suas variáveis serão medidas, de que forma a instrumentação deve ser especificada e, finalmente, como serão controladas.

A especificação da instrumentação, descrita neste trabalho, foi feita para permitir uma análise do comportamento dinâmico das variáveis e para aplicar técnicas de controle avançadas. Outro aspecto importante, descrito neste trabalho, é a análise da precisão dos valores medidos. Alguns trabalhos, por exemplo o de Bergh e colaboradores (1995) e o de Moys e Finch (1988), relatam que um dos problemas associados ao controle para estabilização da coluna reside na imprecisão dos valores medidos, mas, no entanto, não fazem uma análise mais crítica desses erros. Com o resultado da análise dos erros de medição, é possível definir os valores aceitáveis para esses erros, além de determinar as faixas corretas de operação das variáveis.

2. Descrição do processo

A flotação é um processo de concentração de minérios que tem sido cada vez mais utilizado na indústria. Durante décadas, esse processo foi realizado quase que exclusivamente em máquinas mecânicas de sub-aeração. As primeiras colunas industriais entraram em operação em 1980 e, a partir de então, a técnica tem apresentado um crescimento de utilização acentuado, tanto em novas operações, quanto em expansões ou otimizações de circuitos já existentes (Guimarães e Peres, 1995).

O material que alimenta a coluna de flotação (polpa) é condicionado com reagentes específicos em uma etapa anterior, utilizando tanques agitados. Esse material alimenta a coluna a aproximadamente dois terços de sua altura total em contracorrente com um fluxo ascendente de ar alimentado na sua base. O ar introduzido tem a finalidade de gerar bolhas ascendentes e coletar as partículas hidrofóbicas, transportando-as para a espuma. Essa técnica utiliza o princípio de contracorrente para colocar em contato o fluxo descendente de polpa alimentada, com o fluxo ascendente de ar introduzido na base. A colisão entre as partículas, em deslocamento descendente por ação da gravidade, e as bolhas de ar faz com que ocorra adesão entre as partículas minerais hidrofóbicas e essas bolhas, formando uma espuma mineralizada, constituindo assim o flotado que transborda. No topo da coluna, a água de lavagem é adicionada, tendo como principais funções estabilizar a espuma e substituir a água de processo na fração flotada. O material não flotado (afundado ou não-flotado) é retirado pelo fundo da coluna. Quando as partículas do mineral útil são retiradas pelo flotado, a flotação é designada como direta. A situação oposta, em que as partículas do mineral útil são retiradas pelo afundado, caracteriza a flotação reversa.

Na coluna, o material é observado em três fases: polpa, interface polpa/espuma e espuma estabilizada. A região acima da interface é denominada zona de limpeza, enquanto a região entre o ponto de introdução do ar até a interface é denominada zona de coleta ou recuperação. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da coluna.

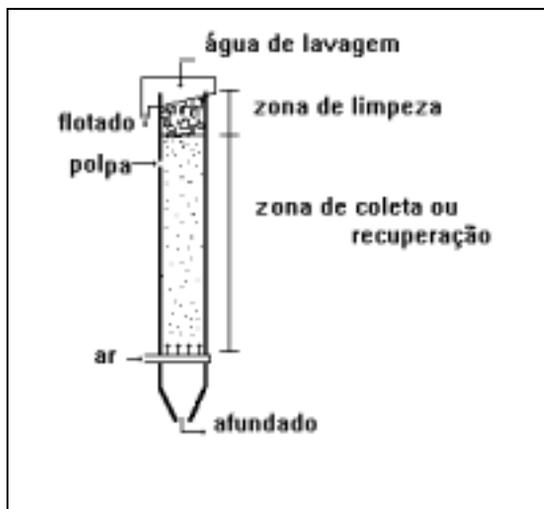


Figura 1: Desenho esquemático da coluna de flotação.

As colunas de flotação comerciais apresentam normalmente diâmetros de 0,5 a 4,0 m e alturas entre 9,0 e 15 m. Para colunas com diâmetros maiores 1,2 m, é comum a colocação de divisões internas (Guimarães e Peres, 1995). Para colunas em escala piloto, a recomendação é usar diâmetro mínimo de 5,1 cm e altura variável entre 4,0 e 9,0 m (Finch e Dobby, 1990). Em colunas de seção não circular é utilizado o conceito de diâmetro equivalente. Neste caso, a área da seção da coluna não circular e a área definida pelo diâmetro equivalente são iguais.

As principais variáveis do processo, sob o ponto de vista de controle, podem ser classificadas e estão distribuídas como apresentado a seguir.

Variáveis Manipuladas:

- 1) vazão de água de lavagem;
- 2) vazão do afundado;
- 3) vazão de ar de alimentação;
- 4) dosagem de reagentes.

Variáveis controladas primárias:

- 1) recuperação (percentagem do mineral útil contida na alimentação que é recuperada no concentrado);
- 2) percentagem de sólidos no concentrado;
- 3) teor do mineral de interesse no concentrado.

Variáveis controladas secundárias:

- 1) nível, ou altura da camada de espuma;
- 2) *bias* (fluxo resultante de água descendente através da camada de espuma);
- 3) *holdup* de ar (percentagem volumétrica de ar em uma determinada região da coluna).

Perturbações:

- 1) variação em relação ao tamanho médio das partículas;
- 2) variação da percentagem de sólidos na polpa de alimentação;
- 3) variação de características mineralógicas na polpa de alimentação;
- 4) variação na vazão de alimentação da polpa de minério que, em operação normal, deve ter média nula, ou seja: a vazão de alimentação deve permanecer constante.

Outras variáveis, relacionadas com a geometria da coluna de flotação (tais como a distribuição da água de lavagem ou a utilização de divisões internas) também interferem no desempenho do processo, mas como este trabalho está sendo realizado para uma coluna já existente, essas variáveis, e outras relacionadas com as características mineralógicas, não serão consideradas.

2.1. Variáveis manipuladas

As variáveis manipuladas estão relacionadas com o processo como descrito a seguir.

Vazão de água de lavagem: a água de lavagem é

introduzida no topo da coluna na zona de espuma e tem como objetivo substituir a água de processo na fração flotada. A utilização da água de lavagem permite a remoção das partículas hidrofílicas que foram arrastadas, conferindo à coluna de flotação a possibilidade de aumentar a seletividade do processo sem perda de recuperação.

Vazão de remoção do afundado: a remoção do afundado deve ser feita de modo a garantir a estabilidade da interface polpa-espuma frente às oscilações da vazão de água de lavagem e, principalmente, de alimentação, uma vez que a vazão de alimentação depende da eficácia da etapa anterior do processo e nem sempre está sob controle da área de flotação (Guimarães e Peres, 1995) .

Vazão de alimentação de ar: as colunas de flotação devem operar com uma vazão de ar ótima, cujo valor depende do tipo de mineral, da recuperação em massa do flotado, da granulometria e do tamanho das bolhas (Guimarães e Peres, 1995). A escassez de ar pode provocar baixa recuperação devido à deficiência de contato entre as partículas e as bolhas. Da mesma forma, o excesso de ar também pode provocar perda de recuperação devido ao aumento do coeficiente de mistura.

Na prática, as vazões de água de lavagem (Q_w), de remoção do afundado (Q_r) e de alimentação de ar (Q_g) não são manipuladas diretamente; as variáveis realmente manipuladas são os comandos para as válvulas ou bombas que controlam essas vazões.

2.2. Variáveis controladas

A recuperação e o teor do mineral útil no concentrado, que são os principais objetivos de controle, não são medidos direta e dinamicamente. Os valores dessas variáveis são obtidos após 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 dos valores da recuperação e do teor inadequados para projeto de sistemas de controle. Dessa forma, estabilizar a coluna em valores pré-determinados da altura da camada de espuma, do *bias* e do *holdup* de ar na zona de coleta passa a ser o objetivo de controle, para obter a recuperação e o teor do concentrado

requeridos. A determinação dos valores de referência para a altura da camada de espuma, *bias* e para o *holdup* de ar na zona de coleta depende, portanto, do rendimento metalúrgico que se deseja obter da coluna.

2.2.1 Nível e altura da camada de espuma

A posição da interface polpa/espuma determina a separação entre as zonas de coleta e de limpeza. O nível de polpa determina a altura da zona de coleta e conseqüentemente influencia a recuperação do mineral útil, enquanto que a altura da camada de espuma determina a zona de limpeza e influencia a seletividade do processo. Se a interface é muito baixa, a zona de coleta fica reduzida e a recuperação pode diminuir; caso contrário, a zona de limpeza fica menor, reduzindo o tempo de drenagem, e o teor do concentrado pode deteriorar (Del Villar et al., 1994). As colunas piloto trabalham geralmente com camadas de espuma que variam de 0,5 m a 1,0 m, e a interface, situada acima do ponto de alimentação, deve ser bem definida (ou seja, a separação entre as zonas de coleta e limpeza deve corresponder a uma mudança significativa no *holdup* de ar) (Guimarães e Peres, 1995).

Para determinar a posição da interface polpa/espuma, e conseqüentemente a altura da camada de espuma, é usado, de forma geral, o princípio da diferença de densidade entre as camadas de polpa e espuma. Nesse caso, os transdutores usados podem ser flutuadores, medidores ultra-sônicos ou medidores de pressão distribuídos ao longo da coluna (Finch e Dobby, 1990). No entanto, a diferença de densidade entre as zonas de coleta e de limpeza não é muito grande, especialmente quando a vazão de alimentação de ar é grande. Outra dificuldade para se medir a posição da interface é o fato de a razão entre a área da seção da coluna piloto e seu volume ser pequena, o que provoca uma resposta muito rápida no nível quando ocorrem alterações na alimentação de polpa ou de ar.

O método mais simples, para medição de nível, consiste na utilização de um medidor de pressão em algum ponto da coluna abaixo da interface. Para esse caso, a pressão e a altura da camada de espuma são dadas por (Finch e Dobby, 1990):

$$P = (H - h)\rho_{cz}g + h\rho_{fz}g \quad (1)$$

$$h = \frac{H\rho_{cz} - P}{(\rho_{cz} - \rho_{fz})g} \quad (2)$$

onde P é a pressão medida e H a altura do ponto de medição da pressão até o topo da coluna. A imprecisão desse método reside exatamente na falta do conhecimento exato das densidades médias da polpa e da espuma que, apesar de poderem ser estimadas, nem sempre se mantêm constantes durante a operação da coluna.

Outra forma usada para medir a altura da camada de espuma é a utilização de três medidores de pressão, sendo um deles colocado na zona de limpeza e os outros dois na de coleta. Nesse caso, a altura da camada de espuma é calculada como:

$$h = \frac{H_1 (P_1 - P_2) - P_1 (H_1 - H_2)}{H_3 (P_1 - P_2) - P_3 (H_1 - H_2)} \quad (3)$$

onde, P_1, P_2, P_3, H_1, H_2 e H_3 são as pressões e as alturas dos três medidores, conforme indicado na Figura 2.

Esse método elimina a necessidade do conhecimento das densidades, mas apresenta alguns problemas. Em primeiro lugar, é necessário que a interface polpa/espuma esteja sempre entre P_2 e P_3 ; depois, o método parte da hipótese de que a densidade ao longo de cada zona é uniforme; finalmente, utiliza apenas as equações estáticas, eliminando o componente dinâmico da pressão associado à velocidade da polpa nas zonas de coleta e limpeza (Finch e Dobby, 1990).

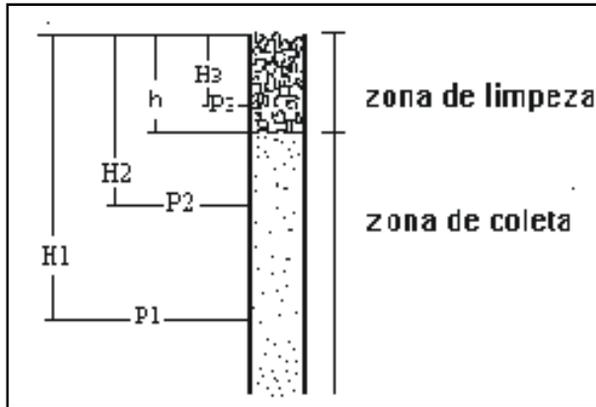


Figura 2: Utilização de diversos medidores de pressão para obtenção da altura da camada de espuma.

A mesma técnica pode ser aplicada utilizando apenas dois medidores de pressão. Portanto,

$$h = \frac{P_1 H_2 - P_2 H_1}{(P_1 - P_2) + \rho_{fz} g (H_1 - H_2)} \quad (4)$$

A equação (4) permite o cálculo da altura da camada de espuma, onde as pressões P_1 e P_2 e as alturas H_1 e H_2 estão relacionadas na Figura 2. Nesse caso, elimina-se a necessidade de um medidor na zona de limpeza, mas é necessário determinar a densidade média dessa zona.

Ainda fazendo uso da diferença de densidade entre as zonas de coleta e limpeza, flutuadores, ou sensores ultra-sônicos, podem ser utilizados para se determinar a interface. Em ambos os casos, é necessário o conhecimento da diferença entre as densidades das zonas de coleta e de limpeza para calibrar os instrumentos. Nesse caso, a variação das densidades das zonas de coleta e de limpeza pode provocar erros nos valores obtidos.

Alternativamente, como a diferença do *holdup* de ar entre as zonas de coleta e limpeza provoca uma diferença na condutividade elétrica medida em cada uma dessas zonas, condutores elétricos podem ser colocados ao longo da coluna, estimando assim o valor

da interface polpa/espuma. A posição da interface corresponde a uma mudança brusca no valor da condutividade, sendo que a forma de estimação da interface depende do arranjo dos sensores ao longo da coluna (Finch e Dobby, 1990).

A utilização, por exemplo, de uma série de eletrodos ao longo da coluna determina os valores da interface em intervalos discretos, o que causa imprecisão nesse método. Uma alternativa, em estudo, para minimizar a imprecisão, é a utilização de Redes Neurais para interpolar esses valores (Del Villar et al., 1994). No entanto, existem grandes dificuldades em treinar a rede, além de ser necessário um treinamento específico para cada caso.

Outro método, também em estudo, é a estimação do nível por meio do perfil de temperatura da polpa ao longo da coluna. Aqui, é usado o princípio da diferença entre a temperatura da polpa alimentada e da água de lavagem (Moys e Finch, 1988). A diferença mínima necessária, para a estimação da interface, depende do tipo de sensor, mas pode chegar até a 4oC. No entanto, manter essa diferença de temperatura artificialmente não se justifica economicamente (Finch e Dobby, 1990).

2.2.2. *Bias*

O *bias* é definido na literatura de diversas formas. Segundo Finch e Dobby (1990), o *bias* corresponde à vazão residual de água descendente através da camada de espuma. Dobby e Kosick (1994) o definem como a diferença entre a velocidade superficial de água de lavagem e a velocidade superficial de água no flotado. Sob o ponto de vista de controle, a definição mais usada é a aproximação do *bias* pela diferença entre a vazão do afundado e a vazão da polpa de alimentação, expressa em termos de velocidade superficial (Finch e Dobby, 1990). Portanto,

$$J_B \approx J_{T-F} = J_T - J_F \tag{5}$$

A equação (5), no entanto, não leva em consideração a presença de sólidos. Com o auxílio de um balanço volumétrico completo, pode-se obter a relação entre J_{T-F} e $J_{B'}$, que é dada por:

$$J_B = J_{Cs} - J_{T-F} \quad (6)$$

onde J_{Cs} é a velocidade superficial de sólidos no flotado (Finch e Dobby, 1990).

A utilização da equação (5) para a aproximação do valor do *bias* é desvantajosa, em primeiro lugar, porque J_B varia com a percentagem de sólidos na alimentação. Além disso, o valor estimado para o *bias* por J_{T-F} é sempre menor que o valor real, o que cria uma demanda desnecessária de água no processo, o que pode provocar perda de capacidade de carregamento na zona de coleta (Finch e Dobby, 1990).

A técnica adotada para medir o valor do *bias* depende de qual definição será usada. Considerando o *bias* como J_{T-F} (equação 5), basta utilizar instrumentos para medir as vazões do afundado e da polpa de alimentação, e calcular a diferença. Com o objetivo de medir o *bias* como definido por Finch e Dobby (1990), é preciso medir as vazões e as densidades de todos os fluxos de entrada e saída da coluna, e posteriormente calcular o balanço de massa. Como a vazão e a densidade do flotado geralmente não são medidas, o *bias* pode ser aproximado por:

$$J_B = J_T (1 - \phi_{sT}) - J_F (1 - \phi_F) \quad (7)$$

onde ϕ_{sT} e ϕ_F são as frações volumétricas de sólidos no afundado e na alimentação, respectivamente (Finch e Dobby, 1990). Esse método de cálculo também é impreciso devido à propagação de erros, já que o valor de J_B é calculado a partir de quatro variáveis, sendo que cada instrumento agrega seu próprio erro de medida. Além disso, o balanço de massa utilizado para a obtenção da equação (7) assume a condição de estado estacionário (Finch e Dobby, 1990).

Com o objetivo de medir o *bias* diretamente, alguns experimentos apresentados na literatura (Moys e Finch (1988) e Bergh e Yianatos (1991) mostram que o perfil de temperatura ao longo da coluna depende do *bias*, mas apenas relações qualitativas foram levantadas. Também existe uma relação entre o *bias* e o perfil de condutividade (Uribe-Salas e Gomez, 1991). Para determinar essa relação, estimando assim o valor do *bias*, Pérez e del Villar (1996) sugerem o uso de redes neurais. No entanto, os resultados

são aplicáveis apenas às condições operacionais testadas, não podendo ser genericamente extrapolados.

Independentemente do método utilizado para medição, no caso de flotação direta, o bias precisa ser positivo para garantir melhor eficiência na lavagem do flotado, prevenindo assim o arraste hidráulico de partículas hidrofílicas para o concentrado, mas não pode ser muito grande, sob o risco de causar uma diluição desnecessária no concentrado, prejudicando o teor (Moys e Finch, 1988). Valores típicos de velocidade superficial de bias estão entre 0,02 e 0,1 cm/s (Finch e Dobby, 1990).

2.2.3. *Holdup* de ar na zona de coleta

O *holdup* de ar é definido como a fração volumétrica de ar em uma determinada zona da coluna. O *holdup* de ar, determinado na zona de coleta, ϵ_{gcz} , constitui um parâmetro que depende da vazão de ar, do tamanho das bolhas, da densidade de polpa, do carregamento de sólidos nas bolhas e da velocidade descendente de polpa (Aquino et al., 1997). O perfil do *holdup* de ar ao longo da zona de limpeza, ϵ_{gfl} , para uma mesma condição operacional, varia de acordo com a subdivisão por seções dessa zona (Yianatos e Finch, 1986). Valores típicos do *holdup* de ar ao longo da coluna são (Yianatos e Finch, 1986):

Zona de coleta: $\epsilon_g < 20 \%$.

Zona de limpeza:

- 1) leito de bolhas expandido $\epsilon_g < 74 \%$;
- 2) leito de bolhas compactado $\epsilon_g > 74 \%$;
- 3) zona de drenagem $\epsilon_g > 80 \%$.

A relação entre o *holdup* de ar na zona de coleta e a vazão de alimentação de ar é usada para definir o regime da flotação. O *holdup* de ar cresce linearmente com o crescimento da vazão do ar até um determinado ponto, a partir do qual a característica linear é perdida. A região linear é caracterizada por uma distribuição homogênea das bolhas que mantêm o tamanho e a taxa de ascensão

uniformes. Esse comportamento é denominado regime de borbulhamento uniforme (*bubbly flow regime*). Após a transposição da região linear, o holdup de ar se torna instável, sendo caracterizado pelo aparecimento de bolhas grandes, que sobem rapidamente deslocando água e bolhas pequenas para baixo. Esse estado é classificado como regime de fluxo turbulento (*churn-turbulent flow regime*) (Finch e Dobby, 1990). O ponto de operação desejado está na faixa linear, já que a recuperação aumenta com o aumento da vazão de ar, quando a coluna opera em regime de borbulhamento uniforme (Guimarães e Peres, 1995).

A técnica mais comumente empregada para medir o *holdup* de ar na zona de coleta é a utilização da pressão diferencial (Finch e Dobby, 1990), em que:

$$\varepsilon_{gcz} = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} g \Delta H} , \quad (8)$$

onde ΔP é a diferença de pressão e ΔH a diferença da altura entre os dois pontos de medição da pressão ao longo da coluna; nesse caso, a densidade da polpa precisa ser conhecida. Para medir o *holdup* de ar em colunas industriais, a solução recomendada é medir a diferença de pressão em uma distância pequena (2 a 3 m) da base da coluna, devendo o primeiro medidor ficar a uma distância mínima dos aspersores (pelo menos um diâmetro da coluna), para evitar distúrbios provocados pela injeção de ar. Dessa forma, a densidade da polpa na zona de coleta pode ser aproximada pela densidade do afundado (Finch e Dobby, 1990). Outra alternativa para medir o *holdup* de ar é o uso do perfil de condutividade. No entanto apenas alguns estudos foram realizados (Banisi et al., 1994; Labuche et al., 1996).

3. Instrumentação para uma coluna piloto

A coluna piloto, utilizada neste trabalho, está montada no Setor de Tecnologia Mineral da Supervisão de Processos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), responsável pelo projeto, pela operação e pela construção dessa coluna. Construída em tubo de acrílico transparente com 5,1 cm de diâmetro interno e altura total de 720 cm, essa coluna é dividida em seis módulos flangeados de 120 cm de altura cada. A retirada do material flotado é realizada em uma calha situada em seu topo e a alimentação é introduzida a 180 cm deste. A introdução de água de lavagem é feita por meio de uma mangueira de 0,8 cm de diâmetro que está fixada dentro da coluna a 20 cm de seu topo. O sistema de aeração é composto por um aerador construído com um tubo de PVC perfurado, revestido de borracha natural microperfurada e coberto por uma tela metálica. O aerador está instalado em uma câmara na base da coluna com diâmetro de 9,3 cm. A remoção do material não-flotado é realizada através de uma peça em formato de cone invertido. A base desta peça está conectada à câmara do aerador e, no seu vértice, a uma mangueira de 1,3 cm de diâmetro.

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático da coluna de flotação, onde estão indicados os instrumentos necessários para medir e manipular as variáveis envolvidas no processo. Os valores de *set-point* para as vazões de ar, água de lavagem, saída do afundado e alimentação de polpa serão gerados por um sistema de supervisão (não representado na Figura 3). Como a altura da camada de espuma, o *holdup* de ar na zona de coleta e o *bias* não são medidos diretamente, os cálculos para a obtenção desses valores também serão realizados pelo sistema de supervisão.

É importante ressaltar que, na fase de estudos e desenvolvimento, como, por exemplo, de obtenção de modelos dinâmicos e de implementação e testes de algoritmos de controle avançados, o número de instrumentos especificados para a coluna de flotação é superior ao usualmente necessário para a operação industrial do processo. Entretanto, a análise aqui apresentada se aplica mesmo nos casos em que a instrumentação é mais restrita. Além disso, todos os instrumentos devem ter as seguintes características básicas:

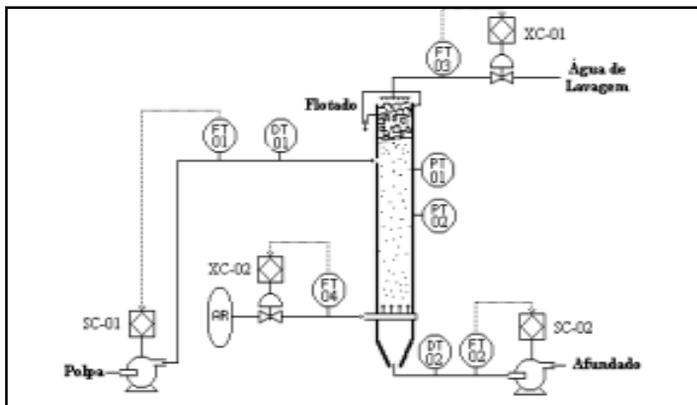


Figura 3: Instrumentação da coluna piloto.

1) possuir sinal de saída ou entrada que permita a interligação com um sistema de aquisição de dados. Esse sinal pode ser analógico na faixa de 4 a 20 mA, ou digital;

2) apresentar características de robustez e precisão. A robustez é necessária para suportar os diferentes tipos de minério e condições operacionais a que a coluna piloto é submetida, como por exemplo as variações de pH, de densidade e abrasividade da polpa. O conhecimento da faixa de precisão, por sua vez, é indispensável para testes e validação dos modelos e das estratégias de controle;

3) possuir flexibilidade na calibração dos valores de fim de escala para que os instrumentos possam se adequar às variadas condições operacionais;

4) assemelhar o máximo possível aos usados em escala industrial, mesmo se tratando de uma coluna piloto, para evitar equipamentos experimentais e para permitir que os resultados obtidos sejam aplicáveis futuramente em escala industrial.

Baseando-se nesses requisitos e na análise das técnicas de medição disponíveis, a instrumentação foi especificada tendo em vista a necessidade de atender a diferentes características operacionais, além dos estudos na área de controle. Como os testes preliminares estão sendo feitos para um sistema bifásico (água e ar), os instrumentos, já instalados, estão calibrados conforme mostra a Tabela 1. A instrumentação completa, conforme apresentada na

Figura 3, está sendo implantada gradativamente.

Tabela 1: Faixa de calibração, para sistemas bifásicos, dos instrumentos já instalados.

Tag	Descrição	Faixa de Calibração
SC-01	Velocidade da bomba de alimentação de polpa	0 a 100% (0 a 3 l/h)
SC-02	Velocidade da bomba de saída do afundado	0 a 100% (0 a 5 l/h)
FT-03	Medidor de vazão de água de lavagem	0 a 1 l/h
FT-04	Medidor de vazão de ar	0 a 8 g/min
XC-01	Válvula reguladora para a água de lavagem	0 a 100%
XC-02	Válvula reguladora para a entrada de ar	0 a 100%
PT-01	Medidor de pressão	5 a 27 kPa
PT-02	Medidor de Pressão	19 a 41 kPa

3.1 Detalhamento da instrumentação especificada

Medição e controle de água de lavagem: para se medir a vazão de água de lavagem é utilizado um medidor eletromagnético de vazão, com montagem em orifício integral, FT-03 e o controle da vazão é realizado por meio de uma válvula pneumática, XC-01.

Medição e controle da vazão de ar: para se medir a vazão de ar, é utilizado um medidor de vazão mássica, FT-04. Como o ar é um fluido compressível, seu volume está sujeito às variações de pressão e de temperatura; portanto, para que a medição de vazão seja eficiente, o instrumento deve possuir compensação interna, tanto da pressão como da temperatura, às quais o fluido está submetido. A variação de temperatura é normalmente pequena e ocorre quando há oscilação da temperatura ambiente de trabalho; no entanto, a variação de pressão é considerável. O ar, introduzido na base da coluna, está sujeito à pressão provocada pela massa total dentro desta; portanto, alterações de nível e *holdup* de ar provocam variações nessa massa e, conseqüentemente, na vazão volumétrica do ar. A partir da vazão mássica, a vazão volumétrica pode ser obtida para condições normais de temperatura e de pressão. Para o controle da vazão de ar foi instalada uma válvula pneumática, XC-02. Alternativamente, o controle da vazão pode ser realizado por meio de um rotâmetro com posicionamento manual.

Medição e controle da vazão de alimentação da polpa: a alimentação da polpa é controlada por meio de uma bomba peristáltica de velocidade variável, SC-01 (controlada por meio de um inversor de frequência). Com o objetivo de monitorar a vazão de polpa que alimenta o processo e garantir uma operação estável, é necessária a utilização de um medidor de vazão volumétrica e um medidor de vazão mássica, FT-01 e DT-01, respectivamente. Com o auxílio desses instrumentos é possível determinar a percentagem de sólidos na polpa de alimentação, além de serem essenciais ao cálculo do balanço de massa, para obtenção do valor do *bias*. Atualmente, o controle da frequência, e, conseqüentemente, da velocidade da bomba, é feito manualmente, de forma a ajustar a vazão de alimentação em um valor pré-determinado e o valor da vazão é medido utilizando provetas graduadas e cronômetro.

Medição e controle da vazão de saída do não-flotado: a vazão de saída do não-flotado é controlada por meio de uma bomba peristáltica com velocidade variável, SC-02 (controlada por meio de um inversor de frequência). Para a implantação de estratégias de controle, é necessária a utilização de um medidor de vazão volumétrica e um medidor de vazão mássica, FT-02 e DT-02, respectivamente. Esses instrumentos permitem o cálculo da recuperação mássica, além de serem essenciais ao cálculo do

balanço de massa, utilizado para obtenção do valor do *bias*. A utilização de uma bomba peristáltica, para controle da vazão de não-flotado requer uma atenção especial, devido à variação de pressão na entrada da bomba, a que essa fica submetida durante a operação. Variações nas condições operacionais, principalmente no nível e no *holdup* de ar, que refletem em última análise no peso da massa total dentro da coluna, fazem com que, para uma mesma velocidade de operação da bomba, ocorram variações no valor da vazão.

Medição de pressão: os medidores de pressão, PT-01 e PT-02, são utilizados para a obtenção dos valores do *holdup* de ar na zona de coleta e da altura da camada de espuma. A opção por medidores de pressão deve-se às seguintes características:

1) diâmetro da coluna piloto é reduzido, o que inviabiliza a utilização de qualquer instrumento que necessite ser inserido dentro da coluna;

2) ainda não estão disponíveis comercialmente instrumentos baseados no perfil de temperatura. Esses instrumentos são experimentais, o que dificulta a sua utilização;

3) devido à variedade de condições operacionais a que a coluna piloto é submetida, as densidades médias das zonas de coleta e de limpeza variam significativamente em cada tipo de operação, o que dificulta a calibração de instrumentos baseados no perfil de condutividade.

A coluna, utilizada neste trabalho, é dividida em módulos. Isto permite que a altura total possa variar com a colocação ou retirada desses módulos. Para diminuir os esforços mecânicos, que podem comprometer a estrutura da coluna, sua parte superior é fixa, e apenas os módulos inferiores podem ser retirados. Por esse motivo, os medidores de pressão PT-01 e PT-02 estão instalados na parte superior da coluna a uma distância de 230 cm e de 350 cm, respectivamente, de seu topo.

4. Análise de erros dos métodos de cálculo

Em função da instrumentação especificada para a coluna piloto, a altura da camada de espuma e o *holdup* de ar na zona de coleta podem ser calculados utilizando as equações (4) e (8), respectivamente. Dessa forma, a determinação da altura da camada de espuma depende das medidas de pressão e do valor da densidade da espuma na zona de limpeza, enquanto que o cálculo do *holdup* de ar na zona de coleta depende das medidas de pressão e do valor da densidade média da polpa. Tanto para determinar a altura da camada de espuma, como para determinar o *holdup* de ar, são utilizados dois valores medidos (PT-01 e PT-02) e um terceiro valor que precisa ser estimado (ρ_{fz} e ρ_{sl}). Por esse motivo, a análise de erros pode ser subdividida em dois grupos. Inicialmente, são analisados os erros causados pelos instrumentos de medida de pressão PT-01 e PT-02. Em seguida, são analisados os erros provenientes dos valores das densidades da polpa e da espuma.

4.1 Erros associados aos medidores de pressão

Os erros ΔP_1 e ΔP_2 , associados aos instrumentos PT-01 e PT-02, provocam erros na altura, Δh , e no *holdup* de ar na zona de coleta, $\Delta \varepsilon_g$, que são dados por:

$$\Delta h = \left| \frac{\partial h}{\partial P_1} \right| \Delta P_1 + \left| \frac{\partial h}{\partial P_2} \right| \Delta P_2 \quad (9)$$

e

$$\Delta \varepsilon_g = \left| \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial P_1} \right| \Delta P_1 + \left| \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial P_2} \right| \Delta P_2 \quad (10)$$

Assim, os erros totais correspondentes são:

$$\Delta h = \frac{(H_2 + h)\Delta P_1 + (H_1 - h)\Delta P_2}{P_2 - P_1 + \rho_{fz}g (H_2 - H_1)}, \quad (11)$$

e

$$\Delta \varepsilon_g = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{\rho_{sl}g (H_2 - H_1)} , \quad (12)$$

onde H_1 e H_2 são as distâncias dos medidores de pressão até o topo da coluna. No caso da coluna piloto usada, essas alturas correspondem a 230 cm e 350 cm, respectivamente, e os instrumentos PT-01 e PT-02 são especificados para apresentar um erro máximo de 1% em relação à medida.

Para obter os erros no cálculo da altura, considera-se que o *holdup* de ar, e portanto a diferença de pressão e a densidade média da camada de espuma permanecem constantes durante a variação da altura da camada de espuma. Na prática, em uma condição operacional real, para manter o *holdup* de ar e a densidade média da camada de espuma constantes, para diferentes alturas, é necessário alterar adequadamente os valores das variáveis manipuladas (vazão de água de lavagem, Q_w , vazão do afundado, Q_T , e vazão de alimentação de ar, Q_g). No entanto, como essas vazões não são utilizadas diretamente no cálculo do erro (equação 11), a análise pode ser feita mantendo os valores de *holdup* de ar e de densidade constantes.

Utilizando a equação (11) para a situação descrita anteriormente, ou seja: *holdup* de ar e densidade constantes, é possível determinar os erros relativos à variação nos medidores de pressão PT-01 e PT-02, conforme mostra a Figura 4 para variação de 1% no valor das pressões, dada uma variação da altura da camada de espuma entre 20 cm e 110 cm. Na Figura 4, estão representadas as diferentes condições operacionais para as quais os valores de P_1 e P_2 e foram calculados. Como pode ser verificado pela Curva 4 ($\varepsilon_g = 30\%$ e $\rho_{sl}=0,3 \text{ g/cm}^3$), que apresenta os menores valores de erro, os erros causados pelos medidores de pressão são menores para valores maiores da densidade da camada de espuma e do *holdup* de ar.

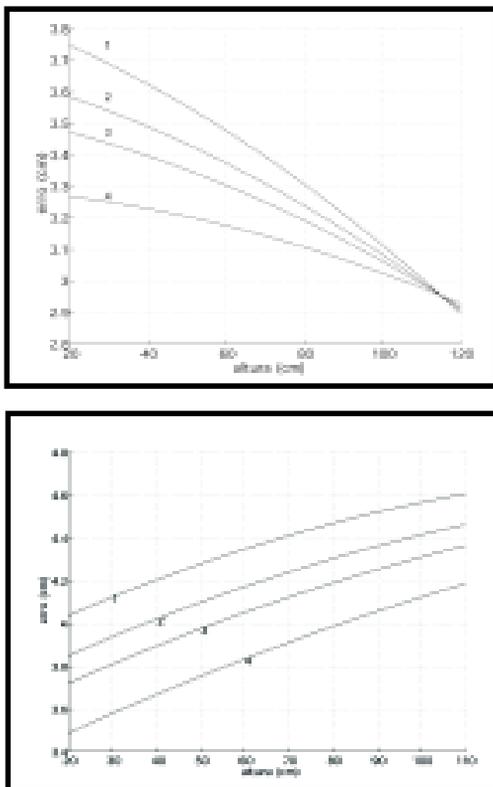


Figura 4: Erros provocados na altura da camada de espuma pela variação nas medidas de pressão PT-01 e PT-02 considerando: $eg = 10\%$, $rfz = 0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 1); $eg = 30\%$, $rfz = 0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 2); $eg = 10\%$, $rfz = 0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 3) e $eg = 30\%$, $rfz = 0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 4).

Para se determinar a propagação de erros no cálculo do *holdup* de ar na zona de coleta, está sendo considerado que a altura e a densidade média da camada de espuma permanecem constantes durante a variação do *holdup* de ar, e a densidade da polpa está normalizada em 1 g/cm^3 . Para manter a altura e a densidade média da camada de espuma constantes, são válidas as mesmas considerações feitas para o cálculo do erro associado à altura da camada de espuma.

Apesar de o *holdup* de ar na zona de coleta ser função da diferença de pressão, o erro depende também do valor absoluto das pressões. Dessa forma, o erro se torna indiretamente função da densidade e da altura da camada de espuma.

A Figura 5 apresenta os erros relativos à variação de 1% nos medidores de pressão PT-01 e PT-02, dada uma variação do *holdup* de ar na zona de coleta 5% e 20%, calculados conforme a Equação (12). Verificando as diferentes condições operacionais, para as quais os valores das pressões foram calculados, observa-se que os menores valores estão associados à Curva 2, onde a altura da camada de espuma é maior ($h=100$ cm).

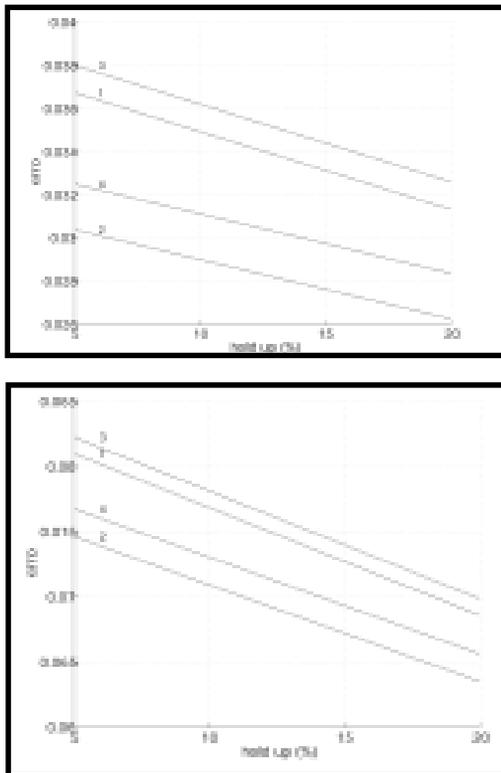


Figura 5: Erros provocados no *holdup* de ar na zona de coleta pela variação nas medidas de pressão PT-01 e PT-02 considerando: $h=60$ cm, $\rho_{fz}=0,2$ g/cm³ (Curva 1); $h=100$ cm, $r_{fz}=0,2$ g/cm³ (Curva 2); $h=60$ cm, $r_{fz}=0,3$ g/cm³ (Curva 3) e $h=100$ cm, $\rho_{fz}=0,3$ g/cm³ (Curva 4).

4.2. Erros associados ao cálculo do *holdup* de ar na zona de recuperação devido à estimativa do valor da densidade de polpa

Para determinação do *holdup* de ar na zona de coleta, é preciso conhecer a densidade da polpa nessa zona. Em sistemas bifásicos, a polpa é composta apenas de água, cuja densidade é conhecida, além de uma quantidade desprezível de reagentes. Nesse caso, não existe nenhum erro adicional ao cálculo do *holdup* de ar, além dos já associados aos medidores de pressão.

Considerando um sistema onde existe polpa de minério, segundo Dobby e colaboradores (1988), o *holdup* de ar pode ser calculado medindo as pressões na parte inferior da coluna, já que a ação de mistura dentro da coluna faz com que a concentração de sólidos na polpa seja aproximadamente uniforme nessa região. Aqui, a densidade da polpa pode ser aproximada pela densidade do afundado (Dobby et al., 1988).

No caso da coluna piloto, como os medidores de pressão estão na parte superior da coluna, os erros causados no cálculo do *holdup* de ar na zona de coleta quando se utiliza o valor da densidade do afundado, como aproximação da densidade da polpa, serão maiores e podem ser calculados pela relação:

$$\Delta \varepsilon_g = \left| \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial \rho_{sl}} \right| \Delta \rho_{sl} = \frac{1 - \varepsilon_g}{\rho_{sl}} \Delta \rho_{sl} \quad (13)$$

A Figura 6 apresenta o erro introduzido no cálculo do *holdup* de ar para variações percentuais de 1%, 2% e 5% na estimativa da densidade da polpa. É importante observar que os valores desses erros dependem do próprio valor do *holdup* de ar, sendo que, quanto maior o *holdup* de ar, menor o erro, e que, quando comparados com a Figura 5, os erros causados pela variação na estimativa da densidade são superiores aos causados pela variação das medidas de pressão.

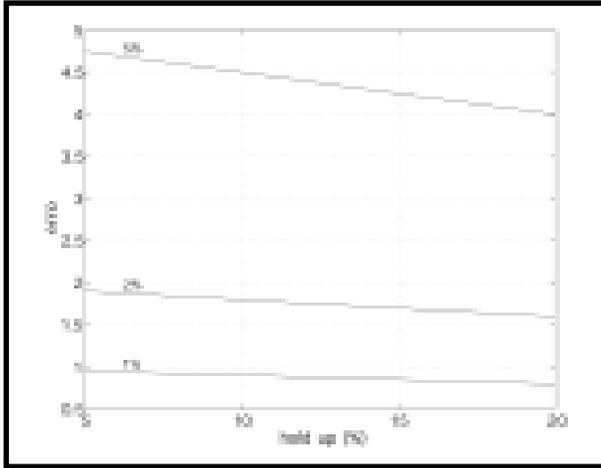


Figura 6: Incidência de erros provocados no cálculo do holdup de ar na zona de coleta pela variação de 1%, 2% e 5% na estimativa de densidade da polpa.

4.3. Erros associados ao cálculo da altura da interface devido à imprecisão da estimativa do valor da densidade da espuma

Considerando que o *holdup* de ar não é constante ao longo de toda a região de limpeza, possuindo um valor crescente a partir da interface até o topo da coluna (Yianatos et al., 1986), a densidade da espuma nessa região exibe um perfil não uniforme, decrescendo a partir da interface. Independentemente dessa variação, é necessário determinar a densidade média da espuma entre a região imediatamente acima da interface até o ponto de transbordo, para calcular a altura da camada de espuma. Após a determinação desse valor, o erro no cálculo da altura da camada de espuma, introduzido pela variação entre o valor real e o valor estimado, é:

$$\Delta h = \left| \frac{\partial H}{\partial \rho_{fz}} \right| \Delta \rho_{fz} = \frac{g(H_2 - H_1)h \Delta \rho_{fz}}{\rho_2 - \rho_1 + \rho_{fz}g(H_2 - H_1)} \tag{14}$$

Utilizando as mesmas condições operacionais e as mesmas considerações descritas anteriormente para a análise da incidência de erros na altura devido às variações nas medidas de pressão, a Figura 7 apresenta os erros relativos à variação de 5% na estimativa da densidade da espuma. Verifica-se que os erros causados na altura da camada de espuma por essa estimativa dependem das condições operacionais, sendo maior para valores maiores do holdup de ar na zona de coleta (Curva 4 da Figura 7, onde $\varepsilon_g=30\%$).

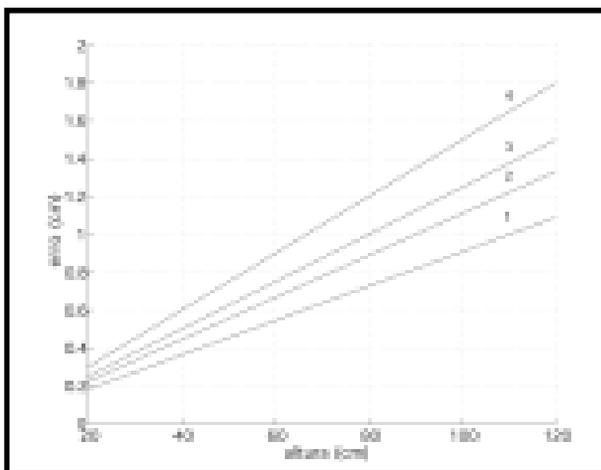


Figura 7: Erros provocados no cálculo da altura da camada de espuma pela variação de 5% na estimativa de densidade da espuma, considerando: $\varepsilon_g = 10\%$, $rfz=0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 1); $\varepsilon_g = 30\%$, $rfz=0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 2); $\varepsilon_g = 10\%$, $rfz=0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 3) e $\varepsilon_g = 30\%$, $rfz=0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 4).

4.4. Análise dos resultados

A utilização da instrumentação especificada para a coluna piloto determina que as variáveis de interesse para controle (altura da camada de espuma, *holdup* de ar na zona de coleta e bias) sejam resultados de cálculos que envolvem valores medidos e valores estimados. Dessa forma, o erro total é consequência não só da calibração dos instrumentos, como também das estimativas dos

valores das densidades da camada de espuma e da polpa na zona de coleta. Considerando que os medidores de pressão estão calibrados para apresentar um erro máximo de 1%, o erro de estimativa da densidade da camada de espuma é no máximo de 5% e o erro de estimativa da densidade da polpa é no máximo de 1%. A Figura 8 representa a associação desses erros para o cálculo da altura da camada de espuma (parte a) e para o cálculo do *holdup* de ar na zona de coleta (parte b) em diversas condições operacionais.

Da análise da Figura 8(a), é possível verificar que o erro percentual para o cálculo da altura da camada de espuma diminui à medida que a altura aumenta; da mesma forma, analisando a parte (b) da mesma figura, verifica-se que o erro percentual no cálculo do *holdup* de ar na zona de coleta também diminui à medida que o *holdup* de ar aumenta. Nessas condições, para que os valores obtidos para a altura da camada de espuma e para o *holdup* de ar apresentem erros inferiores a 10%, a faixa de operação da camada de espuma deve ser superior a 80 cm e a do *holdup* de ar na zona de coleta superior a 10%.

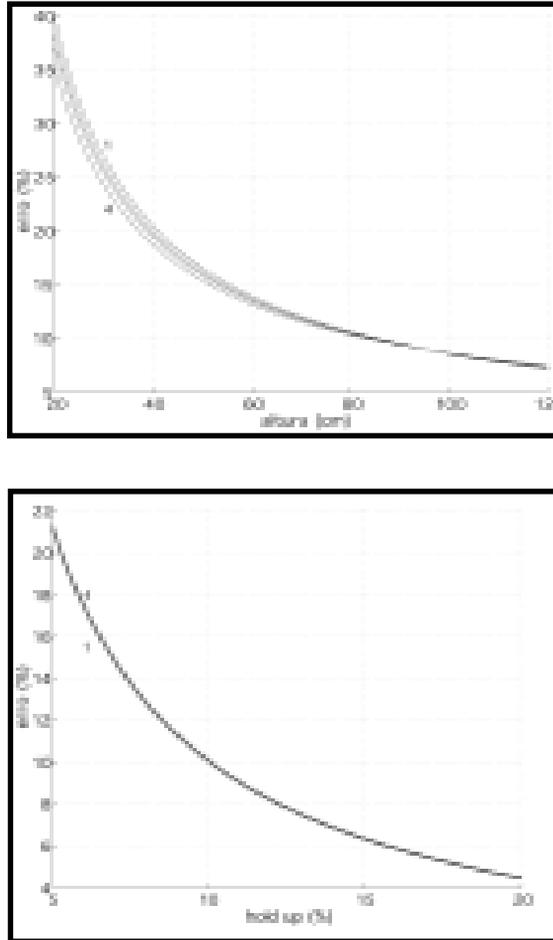


Figura 8: Percentual total de erro (a) Altura da camada de espuma considerando: $eg = 10\%$, $rfz = 0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 1); $eg = 30\%$, $rfz = 0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 2); $eg = 10\%$, $rfz = 0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 3) $eg = 30\%$, $rfz = 0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 4) (b) Holdup de ar na zona de coleta considerando: $h = 60 \text{ cm}$, $rfz = 0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 1); $h = 100 \text{ cm}$, $rfz = 0,2 \text{ g/cm}^3$ (Curva 2); $h = 60 \text{ cm}$, $rfz = 0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 3) e $h = 100 \text{ cm}$, $rfz = 0,3 \text{ g/cm}^3$ (Curva 4).

5. Conclusões

A instrumentação de uma coluna piloto de flotação deve garantir condições para a implantação de técnicas de controle e a supervisão de variáveis importantes, como as vazões de alimentação, de água de lavagem, de não-flotado e de ar, além da altura da camada de espuma, do *holdup* de ar na zona de coleta e do *bias*. Além disso, a instrumentação deve ser projetada para que os efeitos dos erros devido à variação das condições operacionais sejam minimizados. Outro aspecto importante é a utilização de instrumentos semelhantes aos utilizados em colunas industriais para que os resultados possam ser aplicáveis em escala industrial.

A especificação da instrumentação para medir e atuar nas variáveis manipuladas (ou seja, as vazões de ar, de água de lavagem e de não-flotado) requer especial atenção quanto a faixa de operação, que, de uma forma geral, envolve baixas vazões. Para evitar que os efeitos da variação volumétrica do ar interfiram na medição da vazão de ar, o instrumento utilizado deve ser um medidor de vazão mássica com compensação da pressão e da temperatura às quais o ar fica submetido. Para medir a altura da camada de espuma e o *holdup* de ar na zona de coleta, estão sendo utilizados dois medidores de pressão. Dessa forma, evita-se inserir qualquer instrumento dentro da coluna, que possui diâmetro reduzido.

Como as variáveis utilizadas para controle (a altura da camada de espuma, o *holdup* de ar na zona de coleta e o *bias*) não são medidas diretamente, mas são calculadas utilizando valores medidos de pressão e valores estimados de densidade, minimizar erros de calibração dos instrumentos não é suficiente para obter bons resultados. É extremamente importante ter confiabilidade nos valores estimados. Para a altura da camada de espuma, os erros causados por uma estimativa errada na densidade da camada de espuma é da mesma ordem de grandeza que os erros causados pela calibração dos instrumentos. Isto pode ser observado na Figura 4 e na Figura 7 onde, por exemplo, para altura igual a 80 cm e condição operacional da Curva 3, o erro máximo provocado pelos medidores PT-01 e PT-02 é de 3,2 cm e de 4,2 cm, respectivamente, enquanto o erro máximo provocado pela estimativa da densidade da espuma é de

1,0 cm. Para o cálculo do *holdup* de ar na zona de coleta, os erros provocados por uma estimativa errada da densidade da polpa têm impacto muito maior que os causados pelos instrumentos de medição de pressão. Observando a Figura 5 e a Figura 6, verifica-se que o erro máximo causado pelos medidores de pressão não ultrapassa 0,085%, enquanto os erros provocados pela estimativa da densidade da polpa são sempre superiores a 0,5%

Considerando que valores típicos para os erros de medição e estimação sejam da ordem de 1% para os medidores de pressão, de 1% para a densidade da polpa e de 5% para a densidade da camada de espuma, como mostrado na Figura 8, a faixa de operação da altura da camada de espuma deve ser superior a 80 cm e a faixa de operação do *holdup* de ar na zona de coleta superior a 10% para garantir um erro máximo de 10% em cada uma dessas variáveis.

A análise da propagação de erros é fundamental para que os valores da altura da camada de espuma e os do *holdup* de ar na zona de coleta sejam utilizados em estudos de técnicas de controle. Em primeiro lugar, com o auxílio dessa análise é possível definir as faixas de operação em que o controle pode atuar de maneira efetiva. Por outro lado, se os erros de medida dos instrumentos e das estimações das densidades forem maiores que os valores típicos mencionados, os valores calculados para altura da camada de espuma e para o *holdup* de ar na zona de coleta podem apresentar distorções muito grandes. Essas podem fazer com que os projetos de controle, assim calculados, não sejam eficientes, incluindo até ações de controle inversas àquelas realmente requeridas, causando instabilidade no processo.

Finalmente, espera-se que a instrumentação descrita neste trabalho permita um estudo mais aprofundado do comportamento das variáveis, como, por exemplo, definir o grau de interação dessas variáveis e pares apropriados de variáveis controladas e manipuladas. Essas informações são a base para a simulação e aplicação de técnicas avançadas de controle.

Referências bibliográficas

- J. A. AQUINO, M. L. M. OLIVEIRA, M. D. FERNANDES. Tratamento de Minérios, capítulo Flotação em Coluna. CETEM, 1997.
- S. BANISI, J. A. FINCH, A. R. LAPLANTE. On-line gas and solids holdup estimation in solid-liquid-gas systems. *Mineral Engineering*, 7(9):1099-1113, 1994.
- L. G. BERGH, J. B. YIANATOS. Advances in flotation column dynamics and measurements. Em *Column'91*, pag 409, 1991.
- L. G. BERGH, J. B. YIANATOS, C. P. ACUÑA. Hierarchical control strategy for flotation columns. *Minerals Engineering*, 8(12):1583-1591, 1995.
- G. S. DOBBY, G. A. KOSICK. Case studies on circuit design using flotation columns. Relatório Técnico, Minnovex Technologies Inc, 1994.
- G. S. DOBBY, J. A. YIANATOS, J. A. FINCH. Estimation of bubble diameter in flotation columns from drift flux analysis. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 22(2):85-90, 1988.
- J. A. FINCH, G. S. DOBBY. *Column flotation*. Pergamon Press, 1990.
- R. C. GUIMARÃES, A. E. C. PERES. Máquinas de flotação. Relatório Técnico BT/PMI/046, Escola Politécnica DEM-USP, 1995.
- Y. LABUCHE, R. HOUOT, M. V. DURANCE, P. CONIL, M. SAVE, G. MORIZOT. Development of new equipment for froth characterization in a flotation column: sampling system and on-line sensor. *Column'96*, pag 339-351, 1996.
- D. J. MCKEE. Automatic flotation control - a review of 20 years of effort. *Minerals Engineering*, 4(7-11):653-666, 1991.
- M. H. MOYS, J. A. FINCH. Developments in control of flotation columns. *International Journal of Mineral Processing*, 23:265-278, 1988.
- R. PÉREZ, R. DEL VILLAR. Measurement of bias and water entrainment in flotation columns using conductivity. *Column'96*, pag 327-338, 1996.
- A. URIBE-SALAS, C. O. GOMEZ, J. A. FINCH. Bias detection in flotation columns. *Column'91*, pag 391-408, 1991.
- R. DEL VILLAR, R. PÉREZ, P. O. GOMEZ, J. A. FINCH. Use of a neural network algorithm for level sensing in flotation columns. III Latin American Congress on Froth Flotation, pag 85-99, 1994.
- J. B. YIANATOS, J. A. FINCH, A. R. LAPLANTE. Holdup profile and bubble size distribution of flotation column froths. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 25(1):23-29, 1986.