

# CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO APLICADO A FLOTAÇÃO DE COBRE<sup>1</sup>

Rafael Lopes<sup>2</sup>  
Leonardo Vieira<sup>3</sup>

## Resumo

Maximizar a taxa de recuperação de cobre é um dos objetivos na operação de uma planta de flotação. A instabilidade causada pela variação na qualidade do minério e a dosagem de reagentes afetam o percentual de recuperação. Este trabalho mostra como a operação pode ser otimizada através do controle avançado. Intitulado RMPCT (*Robust Multivariable Predictive Control Technology*). O processo é controlado com múltiplas variáveis de entrada, saída e perturbações, através de um modelo preditivo que reflita o comportamento do processo. A implementação baseou-se principalmente no controle automático da espessura da espuma e velocidade das bolhas em cada célula através da manipulação do nível de polpa e do fluxo de ar. A ferramenta utilizada permitiu a minimização dos movimentos necessários para manter o processo dentro de seus limites operacionais. Dentre os resultados obtidos observou-se que o ajuste do perfil de velocidade das bolhas, constatado através da redução de sua variabilidade, contribuiu para uma melhor recuperação de cobre. Dentre os casos mais recentes pode-se citar a implementação realizada para uma das maiores mineradoras de cobre do mercado onde o aumento de produção observado foi aproximadamente 1,5%. Projetos como este podem ser implementados em 7 meses com ROI previsto de 3 meses.

**Palavras-chave:** Flotação; Cobre; Honeywell; *Robust Multivariable Predictive Control Technology*.

## ADVANCED PROCESS CONTROL APPLIED TO COPPER FLOTATION

### Abstract

Maximize the copper recovery is one of the objectives in a flotation unit. The unstable feed quality and chemicals dosage influence on the recovery rate. This paper shows how to optimize the operation using advanced control, called RMPCT (*Robust Multivariable Predictive Control Technology*). The process is controlled with input, output and disturbance variables, through a predictive model that reflects the process behavior. The implementation was mainly based on the foam thickness control and cell bubbles velocity control, through the manipulation of the pulp level and air flow. The tool allowed the minimization of the necessary movements to maintain the process inside its operational limits. Among the obtained results, it was observed that the bubble velocity profile adjustment, observed with the variability reduction, contributed to a better copper recovery. Between the most recent cases, may be cited the implementation made in one of the biggest copper mining companies, where the production increase was approximately 1,5%. Projects like these can be implemented in 7 months and have a ROI of 3 months.

**Key words:** Flotation; Copper; Honeywell; *Robust Multivariable Predictive Control Technology*.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 11º Seminário de Metais Não Ferrosos, 1 a 3 de setembro de 2009, São Paulo, SP.*

<sup>2</sup> *Líder do Centro de Excelência - Honeywell do Brasil*

<sup>3</sup> *Líder de Soluções Avançadas - Honeywell do Brasil*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Overview

Substancial retorno para plantas de cobre pode ser obtido através da utilização de novas tecnologias de controle, que utilizam a infraestrutura existente e requerem uma mínima equipe de suporte. A globalização de mercados e a consolidação de produtores criou um ambiente mais competitivo, que leva à necessidade de otimização de produção e performance nas plantas de recuperação de cobre. Dessa forma, o controle avançado multivariável está tornando-se umas das principais ferramentas em termos de retorno de capital investido. Este artigo discutirá as aplicações e benefícios desta tecnologia para unidades de flotação de cobre.

O desafio atual para qualquer unidade de obtenção de cobre é minimizar o custo de produção por tonelada de produto, consistentemente com considerações ambientais e de segurança. Isto é traduzido na maximização da produção de cobre, em conjunto com minimização (ou racionalização) da utilização de energia.<sup>(1)</sup>

Neste cenário, o processo de flotação é um dos que apresenta o maior potencial para a aplicação de controle preditivo multivariável. Isto se deve a seu maior potencial de obtenção de lucros, com a implementação de controle avançado. Além disto, a flotação é considerada pela maioria das unidades como uma unidade-chave para produção e também é a que oferece melhores condições para a obtenção de uma boa modelagem para APC.<sup>(1)</sup>

## 1.2 Descrição do Processo

A produção do cobre começa com a extração do mineral. Esta pode ser realizada a céu aberto (a exploração mais comum), em galerias subterrâneas ou *in situ*; este último procedimento, minoritário, consiste em filtrar ácido sulfúrico na mina de cobre bombeando, posteriormente, para a superfície as soluções ácidas ricas em cobre. O mineral pode ser extraído por métodos mecânicos, nos quais os óxidos e sulfetos são triturados obtendo-se um pó que contém usualmente menos de 1% de cobre. Este deverá ser enriquecido ou concentrado obtendo-se uma pasta com aproximadamente 15% de cobre que, posteriormente, é seco.<sup>(1)</sup>

Existem dois processos básicos de produção de cobre primário: o processo pirometalúrgico, mais utilizado para os minérios sulfetados, e o processo hidrometalúrgico, apropriado para a extração de cobre de minérios oxidados de baixo teor.<sup>(1)</sup>

### 1.2.1 Processo pirometalúrgico

A indústria de transformação do cobre tem início a partir do minério, cuja extração se dá a céu aberto ou em galerias subterrâneas. Com um teor metálico que varia normalmente entre 0,7% e 2,5%, o minério é submetido à britagem, moagem, flotação e secagem, obtendo-se o concentrado cujo teor de cobre contido já alcança 30%. O concentrado é então submetido ao forno *flash*, de onde sai o mate com teor de 45% a 60%, e este ao forno conversor de onde obtêm-se o *blister* com 98,5% de cobre.<sup>(1)</sup>

### 1.2.2 Processo hidrometalúrgico

A hidrometalurgia é apropriada, principalmente, para a extração de cobre de minérios oxidados de baixo teor. A utilização deste processo para minérios sulfetados implica em uma etapa anterior de beneficiamento do minério para obtenção do concentrado sulfetado, o qual deve sofrer processo de ustulação para transformação em produto intermediário oxidado.<sup>(1)</sup>

O processo hidrometalúrgico consiste, em linhas gerais, em lixiviar o minério moído com solventes adequados, sendo o mais utilizado o ácido sulfúrico, obtendo-se soluções ricas em cobre. Segue-se a filtração da solução e a precipitação do metal através de concentração (utilizando-se ferro), de aquecimento ou por eletrólise.<sup>(1)</sup>

### 1.2.3 Flotação

Flotação em espuma, ou simplesmente flotação, é um processo de separação de partículas sólidas de diversos tamanhos e espécies, suspensas em fase aquosa (polpa). Dependendo do tipo de flotação, direta ou reversa, a superfície da partícula a ser flotada, espécie de interesse ou ganga, é modificada pela adição de reagentes tornando-se hidrofóbica. As partículas hidrofóbicas se aderem a bolhas de ar introduzidas na polpa e são carregadas até a camada de espuma, sendo assim separadas das partículas hidrofílicas. O processo fundamenta-se em dois parâmetros: energia e potencial de superfície.<sup>(2)</sup>

Fatores físicos e químicos são importantes para a flotação. Fatores químicos incluem a química de interface - tensão interfacial e cargas da superfície - ocorrendo nas três fases que coexistem no sistema de flotação (sólido, líquido e gás). A química da interface é comandada pelos reagentes de flotação: coletores, depressores, espumantes, ativadores e modificadores de pH. Já os fatores físicos incluem o arranjo da célula, hidrodinâmica, configuração dos bancos de flotação e componentes operacionais tais como taxa de alimentação, mineralogia, distribuição granulométrica e densidade de polpa.<sup>(2)</sup>

As partículas de minério são formadas por vários grãos cristalinos de diferentes minerais, uns representando espécies minerais a serem concentradas e outros, de menor valor, compondo a ganga a ser rejeitada. O tamanho dos grãos e a forma como estão dispostos em uma partícula é um parâmetro de grande importância para o sucesso da flotação, porque eles estão diretamente relacionados ao grau de liberação de um dado material. Na flotação, as partículas não podem ser nem muito grandes, que não possam ser carregadas pelas bolhas, e nem muito pequenas, a ponto de serem arrastadas pelos fluxos das correntes em separação.<sup>(2)</sup>

No caso estudado e de uma maneira geral, a unidade de flotação consiste em um trem de células, nas quais são inseridos ar (para realizar a formação de bolhas e a flotação propriamente dita) e reagentes facilitadores do processo. Os bancos de flotação são conectados em série e estão presentes em cada célula. Para a unidade em questão, há 3 concentradores e os mesmos estão organizados em 6 células cada um, com arranjo 2-2-2.<sup>(3)</sup>

## 1.3 MPC (*Model Predictive Control*)

MPC (*model predictive control*) é muitas vezes definido como uma família integrada de controladores, onde aplica-se (ou obtém-se) um modelo explícito e separadamente identificável das interações entre as mais diversas variáveis. A

capabilidade principal desta matriz de modelos é prever as respostas do processo com relação a mudanças futuras em variáveis manipuláveis e a possíveis distúrbios. Na prática, o MPC é caracterizado por sua habilidade em lidar com restrições tanto nas variáveis manipuladas, quanto nas controladas. Técnicas de MPC fornecem a única metodologia para lidar com restrições de uma forma sistemática, durante o design e a implementação do controlador. Além disso, a otimização se dá através de uma função objetivo, que considera os parâmetros econômicos (preços) de cada variável. A otimização se dá através da minimização (ou maximização, dependendo da abordagem de cada algoritmo) da função objetivo.<sup>(4)</sup>

As variáveis em um processo que devem ser mantidas dentro de um range operacional ou em um valor-alvo são chamadas variáveis controladas (CVs). Para manter os valores das CVs dentro do objetivo definido pelo controlador, a aplicação ajusta o valor das variáveis manipuladas (MVs). Em um controle “single output-single input”, há apenas uma CV (a entrada do controlador ou o valor do processo) e uma MV (saída do controlador – abertura de válvula). Com a técnica de MPC, há múltiplas MVs e múltiplas CVs. O controlador observa todas as variáveis e as toma juntas em um mesmo sistema. Com isto, a tecnologia considera as interações entre todas as MVs, CVs e DVs (variáveis distúrbio) simultaneamente.<sup>(4)</sup>

#### **1.4 RMPCT (*Robust Model predictive Control Technology*)**

A tecnologia RMPCT representa um avanço das técnicas tradicionais de implementação de controle avançado (MPC). Assim como as anteriores, esta tecnologia modela o processo, realiza as previsões necessárias e utiliza movimentos de controle multivariável para otimizar o processo, mantendo as variáveis dentro dos limites operacionais e respeitando as restrições apresentadas. O ganho em performance e robustez deve-se a uma técnica chamada *funneling*, que faz com que os distúrbios e erros de previsão inerentes ao controlador sejam considerados em seu plano de movimentos futuros. Isto possibilita que a aplicação lide de maneira mais suave e eficiente com erros de modelagem (inversão de ganhos, colinearidades, ganhos menores ou maiores do que os reais, erros na dinâmica).<sup>(5)</sup>

Esta tecnologia tem ainda como características básicas: mínimos movimentos nas MVs, trajetórias ótimas de resposta são calculadas em cada execução, sintonia baseada nas variáveis controladas, e não nas variáveis manipuladas. Para o caso estudado, a aplicação chama-se Profit Flot<sup>TM</sup>.<sup>(5)</sup>

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Objetivos do Controlador**

- Reduzir efeito de interação do nível de polpa entre bancos, evitando a propagação de ondas de nível através das células. Esse objetivo foi atingido, modelando-se o efeito de variação do nível do banco, no banco seguinte.
- Manter o nível de polpa de cobre dentro dos limites operacionais, evitando transbordo de polpa nos lavadores.
- Manter a espessura da espuma acima de um limite estipulado e a superfície da espuma acima do nível do lavador, para garantir a vazão de concentrado.

## 2.2 Estrutura do Controlador

### 2.2.1 Variáveis controladas (CVs)

*Velocidade de Espuma:* No caso estudado, há 2 sinais de velocidade por banco. Tais sinais são alimentados por um sistema de cameras Frothmaster . Um aumento do sinal, dentro de um range operacional, indica aumento na produção de concentrado na célula.

*Espessura da Espuma:* No caso estudado, há 1 sinal por célula. Para garantir uma boa performance de flotação na célula, uma espessura constante de espuma deve ser mantida.

### 2.2.2 Variáveis manipuladas (MV)

*Vazão de ar nas células:* No caso estudado, há uma malha de controle de vazão de ar por célula. O controle multivariável irá gerenciar a vazão de ar, de forma a rejeitar distúrbios ou modificar a velocidade de flotação.

*Controle de Nível:* No caso estudado, há um controle de nível por banco. O controle de nível irá agir, empurrando a espuma para fora do lavador da célula (no caso, há necessidade de acelerar a flotação).

### 2.2.3 Variáveis distúrbio (DV)

*pH:* Um dos principais distúrbios do processo, quando o pH reduz, então a velocidade de espuma aumenta.

*Variação de Tonelagem:* Esse distúrbio ocorre principalmente quando uma linha de moagem é parada. Esse distúrbio inicialmente influencia o nível do primeiro banco e então é propagado pelos outros níveis.

## 2.3 Metodologia de Aplicação

A implementação do RMPCT passou pelas etapas:

Estudo de dados e informações → Pré-Teste → Teste → Modelagem Matemática → Instalação e acompanhamento.

A metodologia de implementação pode ser descrita pelos seguintes passos:

1. Coleta de dados históricos, telas de operação, fluxogramas de processo e informação de engenheiros e operadores, através de entrevistas
2. Revisão do status de todos os instrumentos envolvidos na aplicação, além da configuração/estratégia de controle e parâmetros de sintonia.
3. Após análise de toda informação coletada, definição de uma pré-estrutura para a matriz do controle avançado. Esta matriz irá conduzir os testes iniciais de planta (pré-testes)
4. Antes do início dos testes, a planta deve ser levada ao máximo de estabilidade possível, de forma que cada modificação (step) realizado em possíveis variáveis manipuladas seja percebido pelas variáveis controladas relacionadas. Estas modificações, primeiramente, devem ser percebidas unicamente, de forma a ser identificada a dinâmica e o tempo para o estado estacionário do processo.
5. Na fase de pré-teste, são determinadas as dimensões dos movimentos a serem realizados nas variáveis manipuladas, bem como um esboço dos tempos para as variáveis controladas atingirem o estado estacionário. Além disso, também são identificados de forma primária os efeitos que as variáveis distúrbio geram no processo.
6. Posteriormente ao Pré-Teste, o “Step Test” é realizado, aplicando-se “steps” nas variáveis consideradas manipuladas. Os steps são de graus

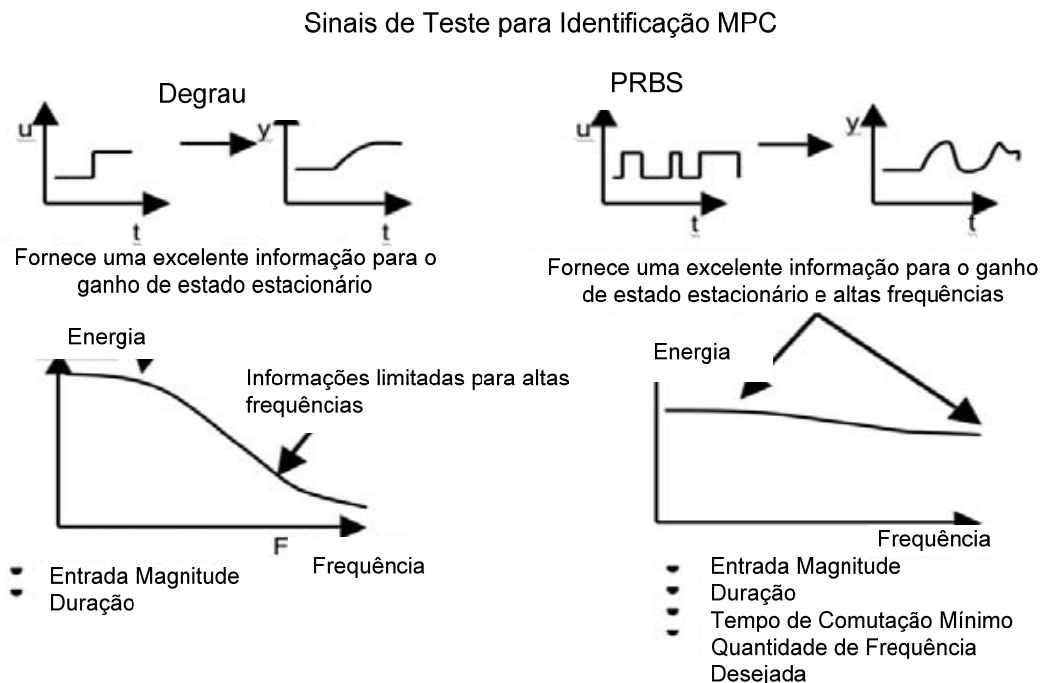
aplicados, com tempos e ordens de grandeza variáveis, de forma a identificar-se as interações que construirão a matriz de controle. O número de degraus será determinado pela precisão necessária para a modelagem.

7. Com base nos dados obtidos pelo Step Test, são feitos os modelos e é montada a matriz do RMPCT. A matriz é validada através da análise das predições e de simulação *offline* do controlador.
8. Após a montagem da matriz, foram configuradas as conexões do software com o SDCD (sistema digital de controle distribuído) da planta, bem como as configurações iniciais de sintonia do próprio software.

## 2.4 Metodologia Utilizada para os Testes

O processo de identificação de modelos é baseado na performance dos dados de entrada / saída, gerados pelos sinais de teste. Sinais de teste são necessários para excitar o sistema tanto no estado estacionário (baixa frequência), quanto em seu comportamento dinâmico (alta frequência). O protocolo de teste é, então, a tarefa mais importante durante a implementação de um controlador multivariável. A maior parte do tempo de implementação consumida durante a geração dos dados para modelagem. Neste contexto, selecionando o melhor gerador de sinal é uma decisão importante, a fim de fornecer dados ricos para a fase de identificação.<sup>(3)</sup>

Dessa forma, há uma necessidade de selecionar os sinais que proporcionarão a maior abrangência do espectro operacional. Devido à sua abrangência, o teste PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) é o mais recomendado para ser utilizado como gerador de sinal, e não os testes normais de degrau ou rampa. A Figura 2 mostra uma comparação típica entre os sinais gerados por um teste comum de degrau (step test) e o teste PRBS.<sup>(3)</sup>



**Figura 1** – Comparação entre *Step Test* e *PRBS Test*.

O PRBS foi utilizado como gerador de sinal para aplicado para o nível de banco e taxa de vazão de ar. Como já comentado, a principal razão para usar tal tipo de metodologia é sua abrangência com relação à identificação de sinais de alta e

baixa frequências. Tal característica garante convergência, durante a fase de identificação de parâmetros de modelos.<sup>(3)</sup>

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Obtenção dos Modelos

O histórico obtido para a modelagem foi suficiente para a obtenção dos modelos. Em média, foram feitos 8 degraus para cada variável. A figura a seguir representa uma parte da matriz de controle multivariável para a unidade de flotação.

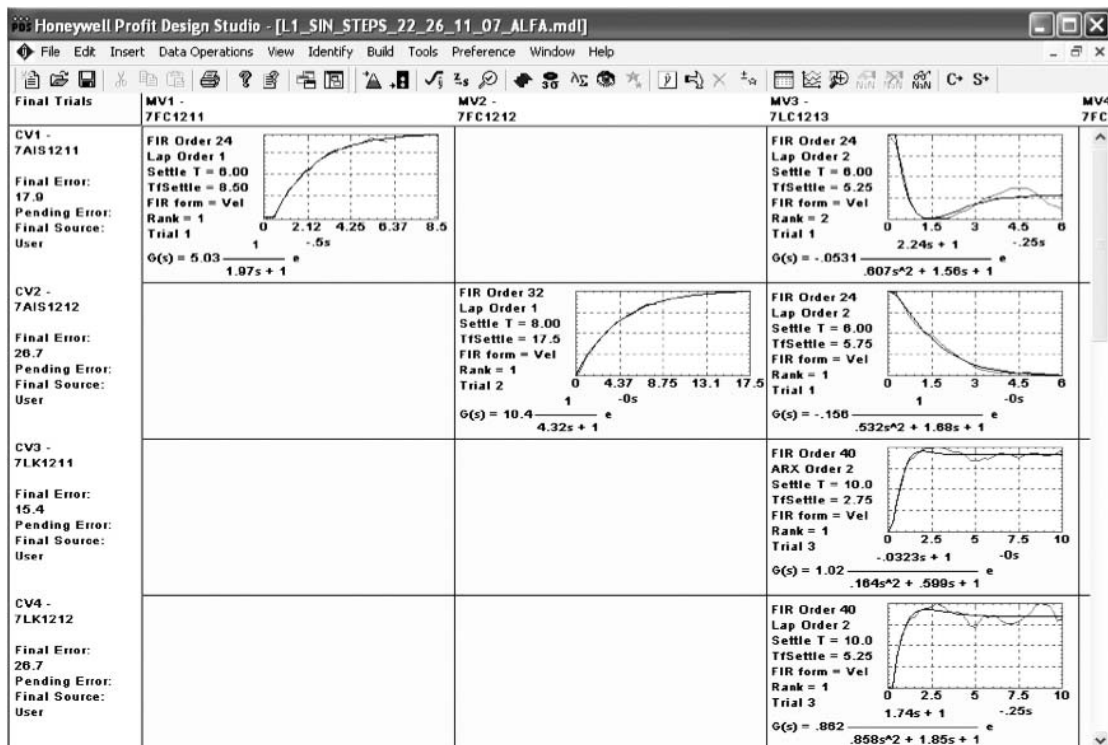


Figura 2 – Parte da Matriz de Controle Multivariável para a Unidade de Flotação de Cobre.

A maneira que o controle foi concebido, juntamente com a seleção das variáveis controladas, forçou a floatabilidade da espuma, maximizando dessa forma o tempo para o concentrado de cobre fluir para os lavadores. Os resultados principais podem ser resumidos como os seguintes:

- estabilização da velocidade de espuma; e
- aumento da recuperação de cobre

Ambos os resultados serão descritos e ilustrados nos parâmetros seguintes.

#### 3.2 Estabilização da Velocidade de Espuma

Durante 15 horas de operação, operando-se com e sem o controle multivariável, os eventos de falta de vazão de concentrado para os lavadores baixaram de 15% para 10%, quando o controlador estava em uso.

Na Figura 2, a velocidade de espuma é apresentada em operação manual e operação sob o controle avançado. Durante a operação do controlador, observa-se uma proximidade mais acentuada aos limites. Além disso, o desvio padrão da

velocidade da espuma foi reduzida de 35,3 mm/s para 20,5 mm/s com o controle avançado.

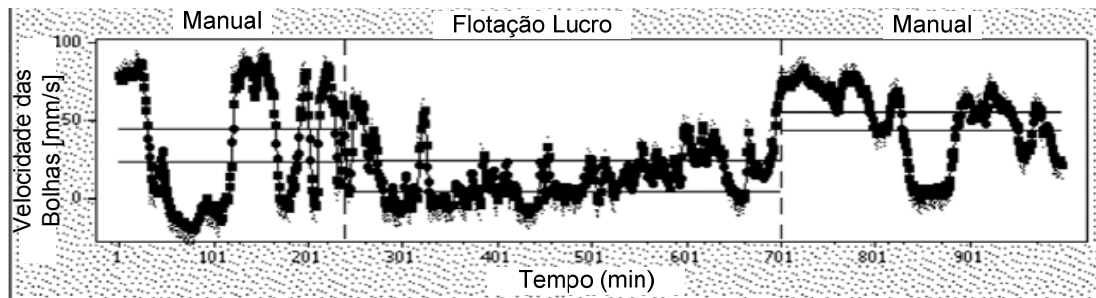


Figura 3 - Velocidade de espuma com e sem controle multivariável.

Uma visão diferente do mencionado acima, fato também é mostrado quando uma análise estatística é realizada sobre os dados de duas células em particular (no caso estudado, células 7 e 12). Na Figura 4, a distribuição de velocidade de espuma é apresentada para um tempo total de oito horas em operação manual e quatro horas para operação com controle avançado.

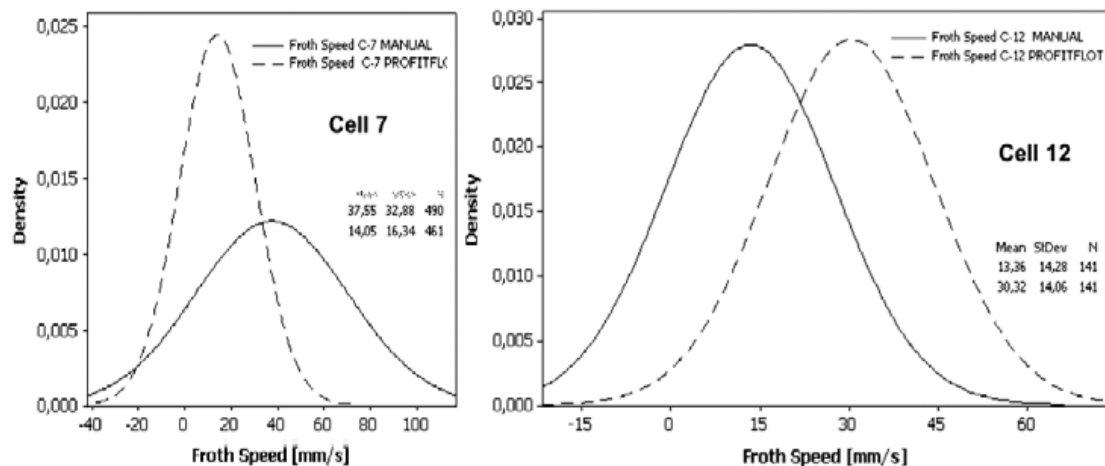


Figura 4 – Distribuição de Velocidade de Espuma (Froth Speed) em Operação com e sem Controle Avançado

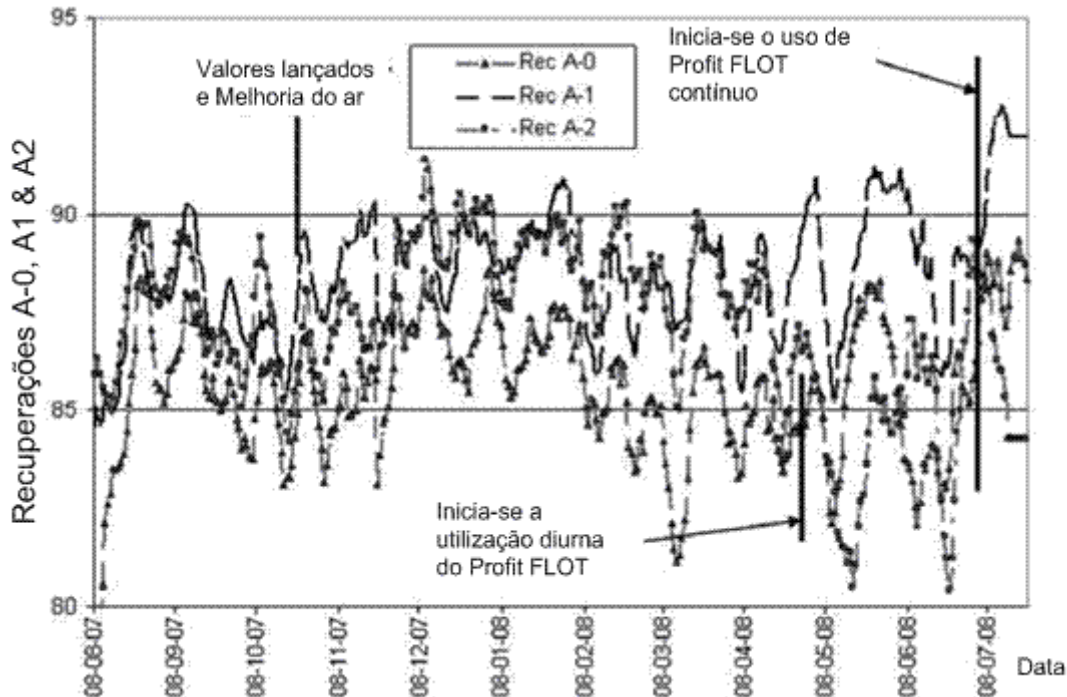
Na célula 7, há uma redução no desvio padrão e na célula 12 células este índice é aproximadamente o mesmo, indicando a necessidade de mais esforços de sintonia, o que foi posteriormente realizado. Na célula 7, a velocidade média de espuma é menor quando o controle avançado é utilizado, por isso ainda há oportunidade extra para acelerar a flotação, com uma melhor escolha do range operacional estabelecido para o funcionamento do controlador.

### 3.3 Aumento da Recuperação de Cobre

Estabilização da operação e controlabilidade do processo são viabilizadores necessários para atingir o objetivo do negócio. O objetivo principal do negócio é a obtenção de lucro marginal, cujo comportamento está intimamente relacionado com o aumento da recuperação de cobre. Sendo assim, sob o ponto de vista metalúrgico, o índice de recuperação tem sido analisado desde 2006.

Uma síntese da recuperação dos 3 concentradores (denominados A-0, A-1 e A-2) é apresentada na Figura 5.





**Figura 5 – Evolução do comportamento dos concentradores.**

O principal resultado é que, após a o início da utilização regular da solução de controle avançado multivariável, a recuperação do concentrador A-1 mostrou um aumento médio de cerca de 1,5% com relação a si próprio, em período anterior, sem utilização do RMPCT. No início da implementação, o tempo médio de utilização era de apenas 25%; entretanto, após contínuo treinamento de operadores e costume com a ferramenta, o índice de utilização encontra-se consistentemente perto de 100%.

É importante salientar que, com maior utilização do controlador, juntamente com práticas de melhoria contínua, baseada na estratégia de melhora na formação de operadores, há alguns benefícios marginais que deverão ser capturados.

#### **4 CONCLUSÃO**

Uma implementação bem sucedida do RMPCT na unidade de flotação de cobre foi descrita em detalhes. A redução da variação na velocidade de espuma e uma maior estabilidade na operação foram encontradas. Também, a oportunidade de operar a planta mais proximamente dos limites e o controle do nível dos bancos representou uma oportunidade de aumento da recuperação de cobre e consequente desengargalamento da unidade. O consumo de ar e reagentes não mudou significativamente em termos absolutos após a implementação do controlador, fato este também devido ao aumento de recuperação de cobre.<sup>(6)</sup>

Apesar da complexidade no processo de flotação, o controlador tem mostrado ser uma ferramenta muito promissora para a implementação de estratégias para controle avançado destes processos, mesmo com altas não-linearidades e dificuldade de obtenção de dados consistentes para modelagem.<sup>(6)</sup>

## REFERÊNCIAS

- 1 Loyola, L. M., " Avaliação do Desempenho da Mini Planta-Piloto de Flotação da CVRD: Estudo Comparativo com Plantas Industriais", Defesa de Tese de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, Brasil (2006)
- 2 PERES, A.E.C. Flotação. Apostila do Curso de Flotação – Pós Graduação UFMG, 2004.
- 3 Cortés, G., Verdugo, M., Fuenzalida, R., Cerda, J., Cubillos, E., "Rougher Flotation Multivariable Predictive Control; Concentrator A-1 Division Codelco Norte", PROCEMIN, Santiago, Chile (2008).
- 4 Garcia, C.E., D.M. Prett and M. Morari (1989). "Model predictive control: Theory and practice - a survey". *Automatica* 25(3), 335–348.
- 5 Qin, J., Badgwell, T., "An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology". Department of Chemical Engineering, Rice University, USA (1997)
- 6 Lopes, R., Charr, J. , "Alunorte Digestion Phase I Detail Design V2.1", Belém, Brasil (2007).