

# SIMULAÇÃO DINÂMICA PARA VERIFICAÇÃO DOS GANHOS COM A IMPLANTAÇÃO DE CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSO PARA UM PROCESSO DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA<sup>1</sup>

Marco Aurélio Soares Martins<sup>2</sup>  
Flávio José da Silva Carvalho<sup>3</sup>  
Rodrigo Cesar de Miranda<sup>4</sup>

## Resumo

Esse trabalho consiste em quantificar os ganhos da implantação do controle avançado de processo no circuito de separadores magnéticos de uma usina de beneficiamento de ferro através de simulação dinâmica. A metodologia utilizada foi de variar a granulometria e o teor de Fe e SiO<sub>2</sub> na alimentação da planta e simular o seu desempenho, tanto pelo controle avançado como com o controle manual. Para tal, configurou-se no OptSim<sup>®</sup> o modelo matemático do circuito de separação magnética e regras especialistas que representavam o controle manual e avançado do processo. Após as simulações, tem-se então a comparação das recuperações mássicas e metalúrgicas e a comparação da variabilidade no teor de SiO<sub>2</sub> no PFF, para os dois tipos de controle. Foi possível verificar o ganho na qualidade do produto com a implantação do controle avançado no circuito de separação magnética. Além disto, constatam-se ganhos nas recuperações, tanto mássica como metalúrgica.

**Palavras-chave:** Simulação dinâmica; Controle avançado de processo; Separação magnética.

## DYNAMIC SIMULATION TO VERIFICATION OF THE GAINS WITH AN IMPLEMENTATION OF ADVANCED PROCESS CONTROL FOR A MAGNETIC SEPARATION PROCESS

### Abstract

This work consists to quantify the gains of implement an advanced process control in magnetic separators circuit in iron plant treatment through dynamic simulation. The methodology applied was change the particle size and composition of Fe and SiO<sub>2</sub> in plant feed and simulates its performance by manual and advanced control. For this, the magnetic separation circuit mathematical model and specialist rules to describe the manual and advanced control were configured in OptSim<sup>®</sup> to represent the process. After the simulations, was possible compare the mass and metallurgical recuperation and variation in composition of SiO<sub>2</sub> in PFF for both controls. The increase in product quality was verified using the advanced process control in magnetic separation. Moreover, the results demonstrated gains in mass and metallurgical recuperation.

**Key words:** Dynamic simulation; Advanced process control; Magnetic separation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro de Minas, Diretor de Operações, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

<sup>3</sup> Engenheiro de Minas, Engenheiro de Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

<sup>4</sup> Engenheiro Químico MSc, Engenheiro de Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias de mineração e metalurgia no Brasil tiveram recentemente um momento extraordinário, caracterizado por grandes demandas com altos preços de seus produtos. Contudo, este quadro mudou drasticamente com a crise financeira mundial. A demanda de minério e produtos siderúrgicos diminuiu repentinamente, obrigando a reorganização do mercado. Os preços dos metais caíram, muitas vezes, a níveis críticos, inviabilizando alguns negócios. Assim, o cenário atual exige ações para redução de custos e utilização de novas tecnologias que aditem valor ao processo produtivo e se traduzam em maior competitividade e maximização de lucros.<sup>(1)</sup>

Processos produtivos de beneficiamento mineral e metalúrgicos constituem em sistemas complexos, não-lineares, influenciados por inúmeros fatores. Assim, estratégias de controle complexas não podem ser convenientemente implantadas utilizando a tecnologia de controle convencional. A carência de informações sobre a natureza da relação entre as variáveis controladas e manipuladas é a principal limitação desse controle. Este problema se agrava pelo fato que importantes distúrbios, como as mudanças na composição e dureza do mineral, não são mensurados previamente.

Os sistemas de controle avançado de processos oferecem numerosas alternativas para contornar tais dificuldades, principalmente a utilização de modelos, e podem ser desenvolvidos tão flexíveis quanto necessários. Sua estratégia de otimização supervisiona o processo e, de acordo com a necessidade atual, fornece *set points* aos controladores, respeitando as prioridades e restrições da planta. A utilização de modelos fenomenológicos nesses sistemas de controle possibilita obter informações do processo em tempo real, permitindo identificar e prever as causas de distúrbios nas variáveis controladas. Técnicas de controle avançado de processo estão entre os métodos mais efetivos em custo e prazo para melhorar o desempenho da planta.

Como objeto de estudo de caso escolheu-se o processo de separação magnética. Esse processo de separação é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e, ou, purificação de minerais.<sup>(2)</sup> Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas as espécies mineralógicas individualmente.

Recentemente tem-se verificado grandes avanços no desenvolvimento de separadores magnéticos, tornando-os tecnicamente eficientes e viáveis economicamente para serem implantados nas plantas.

O trabalho consiste em quantificar os ganhos da implantação do controle avançado de processo no circuito de separadores magnéticos de uma usina de beneficiamento de ferro, através de simulação dinâmica. Para tal, a CEMI desenvolveu o Optsim<sup>®</sup>, que é um sistema para simulação dinâmica de processos.

## 2 SIMULAÇÃO DINÂMICA DE PROCESSOS

A tecnologia de simulação tem uma ampla aplicação, como análise de processos e otimização, projetos de usinas, dimensionamento de equipamentos, balanço de massas e até treinamento de operadores. Assim, sua utilização como ferramenta na indústria traz um alto retorno do investimento, além da aquisição do conhecimento e domínio do processo.

A simulação dinâmica representa um novo marco no campo da otimização de processos minerais. A possibilidade de simular, através de inferências estatísticas, a variabilidade natural da planta, como sua alimentação, conduz a resultados que mostram todo o horizonte de operação. Também, podem ser alterados parâmetros que evidenciam a eficiência dos equipamentos, demonstrando seu desgaste com o tempo e até mesmo a retomada de valores normais, após uma parada de manutenção.

O Optsim<sup>®</sup> é um sistema desenvolvido pela CEMI para simulação dinâmica de processos de beneficiamento mineral, tanto *on-line* (dados coletados diretamente da planta) quanto *off-line* (dados históricos). É uma ferramenta robusta e confiável para desenvolvimento de um banco de dados e avaliação do desempenho do processo. Sua estrutura é composta de diversos módulos, sendo:

- sistema especialista;
- estatística condicional;
- modelo fenomenológico; e
- banco de dados.

Além disso, pode interagir com simuladores externos a sua estrutura.

O módulo de sistema especialista pode ser configurado para tomar as decisões usuais dos operadores, apresentando um relatório das ações. Esse relatório indicará o desempenho da planta, assim compreendendo as boas e más práticas de controle do processo. Outra possibilidade seria, através de dados *on-line*, introduzirem as boas práticas de controle e comparar os resultados obtidos da simulação para encontrar falhas nos procedimentos atuais, conduzindo ao real conhecimento da planta.

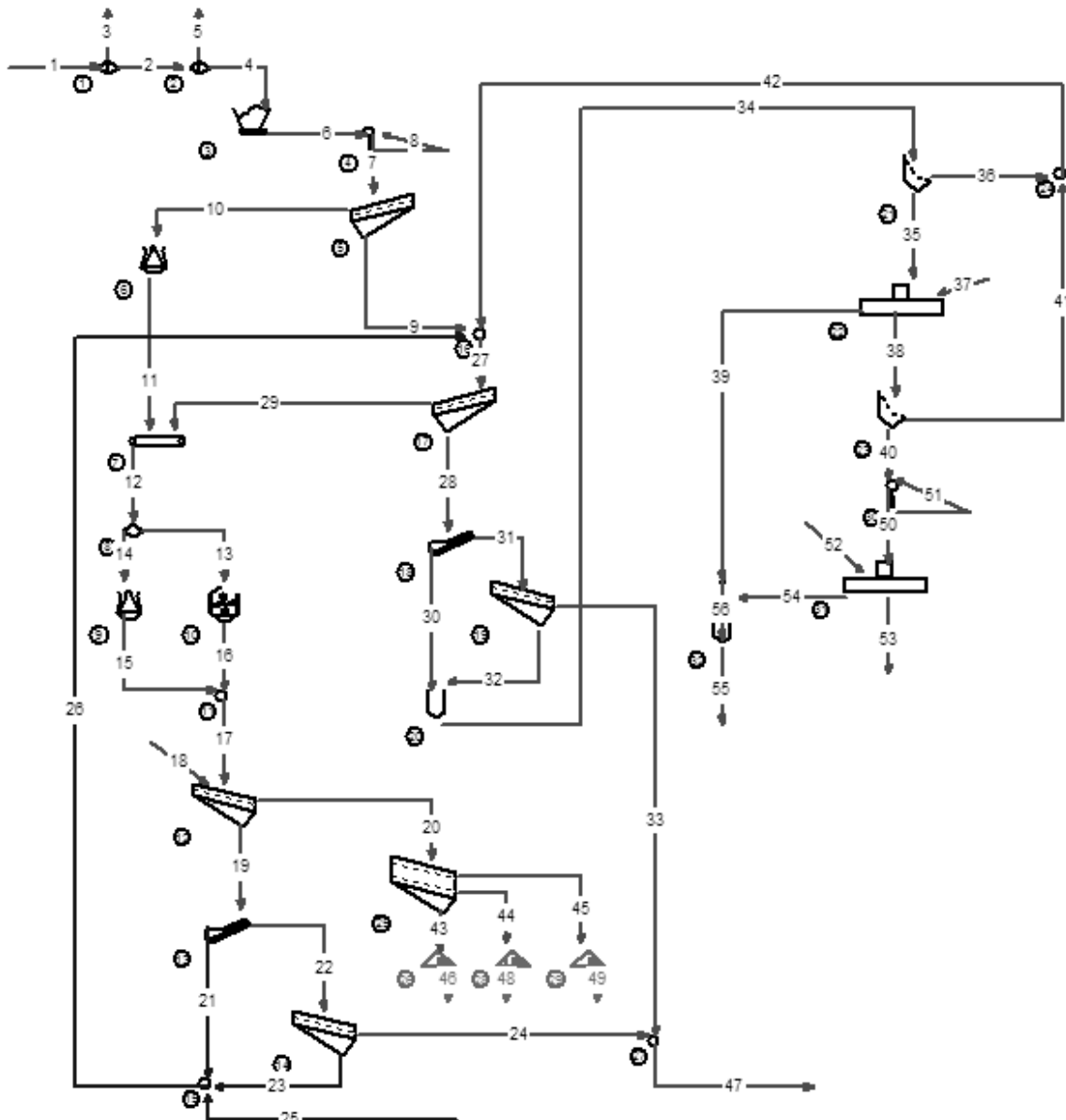
A confiabilidade do sistema está na validação dos dados adquiridos para a simulação. Os valores obtidos da planta apresentam erros sistêmicos e, ou, aleatórios, que poderiam prejudicar a análise. Através dos módulos estatísticos e especialista se configura as análises de dados e suas correções.

### 3 ESTUDO DE CASO

A metodologia adotada é variar o teor de ferro (Fe), sílica (SiO<sub>2</sub>) e a granulometria, da porcentagem retida em 6,35 mm ( > 6,35 mm) na alimentação da planta, considerando tanto o controle manual, quanto com o controle avançado, através da simulação dinâmica do processo. Após estas simulações, tem-se então a comparação das recuperações mássicas e metalúrgicas e a comparação da variabilidade no teor de SiO<sub>2</sub> do PFF para os dois controles.


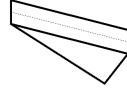
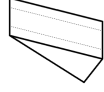
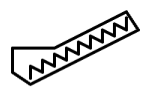


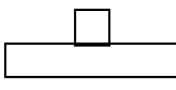


Nessa abordagem utilizou-se no sistema OptSim<sup>®</sup> o USIM PAC 3.1 como programa externo de simulação. O USIM PAC tem um banco de modelos matemáticos, tanto fenomenológicos, quanto físicos para produzir um simulador estático da planta<sup>(3)</sup> e, a partir de sua integração no sistema, realizar as simulações dinâmicas.

A partir de um fluxograma conceitual, apresentado na Figura 1, e de dados de química e granulometria de diversas amostragens da alimentação e dos produtos de uma usina de beneficiamento com separação magnética em seu processo, produziu-se um simulador que representa com fidelidade a média dos dados fornecidos.



**Figura 1** – Fluxograma conceitual utilizado USIM PAC.

Abaixo se encontra a legenda dos equipamentos mostrados na Figura 1:

		
Peneira	Peneira de 1 deck	Peneira de 2 decks
		
Classificador Espiral	Britador Cônico	Britador de Martelos
		
Separador Magnético	Silo	Tanque

Os modelos utilizados nas peneiras usam a função de Rosin-Rammler para representar a curva de partição que expressa a proporção de cada classe de tamanho de partícula da alimentação que se reporta para o fluxo grosso. Nesses modelos foram determinados a inclinação, o corte e o *by pass* da peneira.

Para o classificador espiral, que é o equipamento que antecede os separadores magnéticos e é essencial para o controle de porcentagem de sólidos da alimentação dos mesmos, inicialmente se utilizou um modelo idêntico as peneiras para fechar o balanço de massas. Depois calibrou um modelo fenomenológico, com dimensões reais de equipamentos, para controlar o corte e a porcentagem de sólidos do overflow, que é a alimentação dos separadores magnéticos. Esse modelo é derivado da descrição da concentração gravitacional de minérios pelas médias da curva de partição por densidade de Fournol.<sup>(4)</sup>

Para o britador foi utilizado um modelo simplificado, baseado no modelo de cinética de quebra.<sup>(5)</sup>

Para o separador magnético empregou um modelo sensível ao campo magnético, onde a curva de partição é função do tamanho de partícula e suscetibilidade. O modelo é baseado no modelo empírico de Dobby and Finch para operação de separador magnético de alta intensidade,<sup>(6)</sup> no qual a probabilidade de captura é proporcional a razão entre a força magnética e a força hidrodinâmica que tende desalojar a partícula.

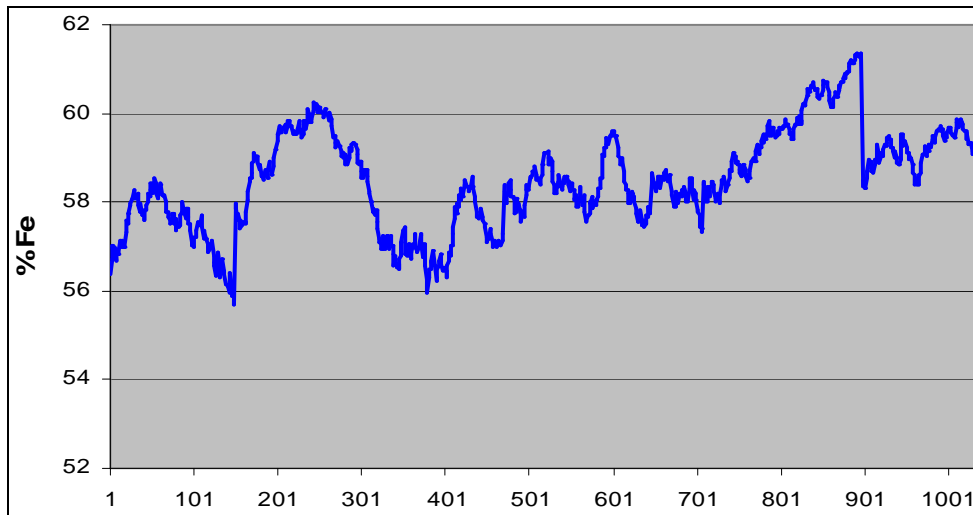
### 3.1 Variação do ROM

Para a simulação dinâmica variou-se a granulometria e o teor da alimentação da planta. A Tabela 1 mostra como se variou o teor de Fe, SiO<sub>2</sub> e > 6,35 mm.

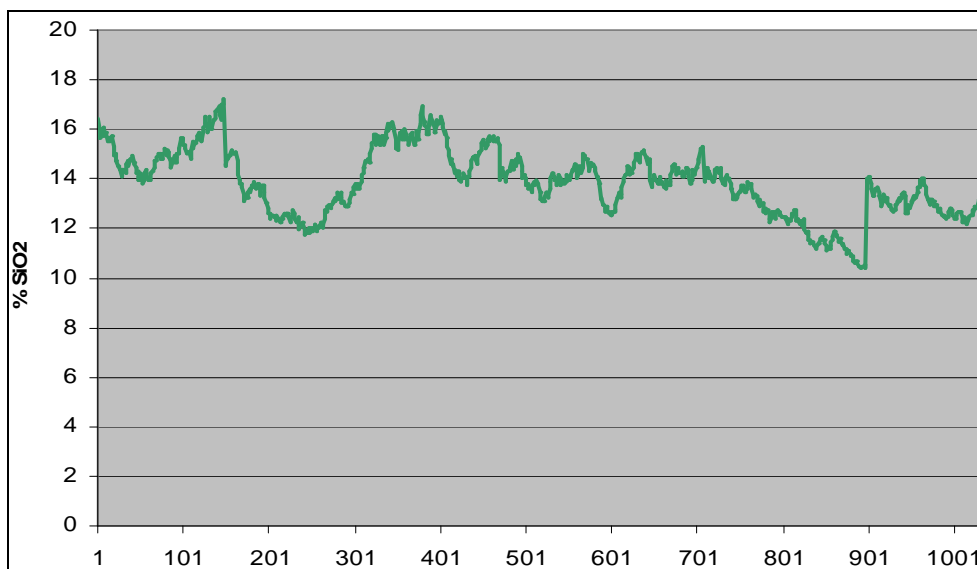
**Tabela 1** – Variação granulométrica e química do ROM

	<b>Teor Fe</b>	<b>Teor SiO<sub>2</sub></b>	<b>&gt; 6,35 mm</b>
Média	58.51	13.85	15.8
Desvio Padrão	1.12	1.35	4.9
Mínimo	55.69	10.40	6.5
Máximo	61.36	17.26	28.0

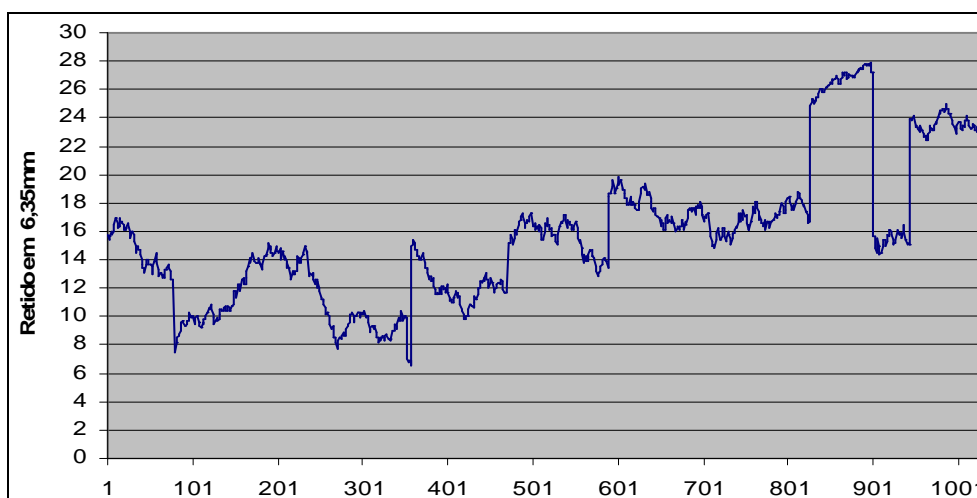
Os gráficos das Figuras 2 a 4 mostram a variação de Fe, SiO<sub>2</sub>, e retido na malha de 6,35 mm, respectivamente, na alimentação da planta durante o processo de simulação.



**Figura 2 –** Variação do teor de Fe do ROM.



**Figura 3 –** Variação do Teor de SiO<sub>2</sub> do ROM.



**Figura 4 –** Variação do retido em 6,35 mm do ROM.

## 3.2 Estratégias de Controle

As estratégias desenvolvidas baseiam-se em controles consagrados, observando as particularidades da planta, a natureza das operações unitárias e os objetivos de produção, recuperação e qualidade. Essas estão descritas abaixo:

### 3.2.1 Controle da Alimentação da Planta

O objetivo do controle é estabilizar a alimentação dos separadores magnéticos, evitando perdas no rejeito por alimentação excessiva, além de manter a estabilidade na operação dos equipamentos.

Então, a alimentação da usina de beneficiamento é controlada para adequar a vazão volumétrica e a densidade de alimentação dos separadores magnéticos. A estratégia deste controle é manter a vazão de alimentação dos separadores magnéticos próxima a capacidade máxima dos equipamentos, mantendo a densidade constante em torno de 50% de sólidos, garantindo o bom funcionamento dos WHIMS.

### 3.2.2 Controle do Separador Magnético

O objetivo do controle é manter o teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado dos dois separadores magnéticos estáveis, manipulando o campo magnético.

O teor de sílica no concentrado dos separadores magnéticos foi controlado alterando a intensidade do campo magnético. Não foi possível controlar a adição de água de lavagem, por causa da limitação do modelo. Alterando somente o campo magnético, não é possível alterar a seletividade do processo, mas é possível variar a recuperação e adequar o teor de  $\text{SiO}_2$  no concentrado em 3,1%.

Através dessas estratégias, foram estabelecidas regras especialistas por inferência *fuzzy* ou *crisp*, responsáveis pela alteração das variáveis manipuláveis. As regras de controle manipularam constantemente os set points do processo, a fim de manter as variáveis controladas dentro de faixas aceitáveis.

Consideraram-se dois controles: (1) controle manual, imitando a atuação do operador da sala de controle, utilizando o sistema especialista e lógica *crisp* com menor frequência de atuação; (2) controle avançado, simulando um sistema de controle avançado de processos, utilizando sistema especialista, estatística condicional e inferência *fuzzy* com maior frequência de atuação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os gráficos e tabelas a seguir apresentam a comparação dos resultados obtidos com o OptSim<sup>®</sup> simulando a planta com controle avançado e controle manual.

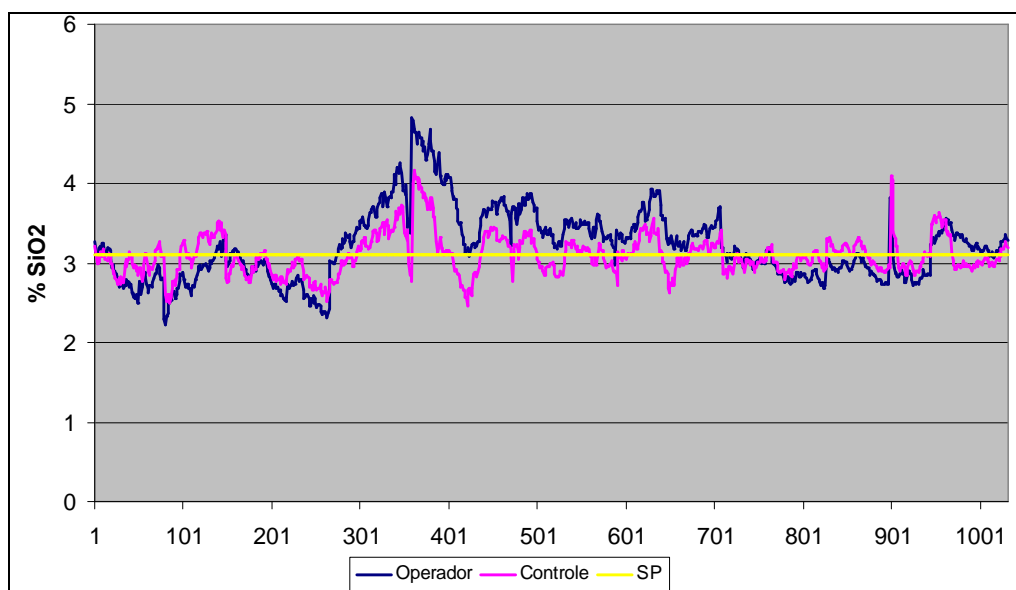
### 4.1 Variabilidade no Teor de Fe e $\text{SiO}_2$ no PFF

A Tabela 2 apresenta os resultados de teor de Fe e  $\text{SiO}_2$  no concentrado dos separadores magnéticos (PFF). Pode-se observar que o controle avançado, em média, obteve o teor objetivo de  $\text{SiO}_2$ , tendo como desvio padrão 0,29; já o manual obteve um teor um pouco acima do objetivo, com o desvio padrão mais alto, 0,44.

**Tabela 2 – Teor de Fe e SiO<sub>2</sub> no PFF**

	Teor Fe		Teor SiO <sub>2</sub>	
	Manual	Avançado	Manual	Avançado
Média	67.35	67.42	3.21	3.12
Desvio Padrão	0.35	0.23	0.44	0.29
Mínimo	66.08	66.37	2.21	2.46
Máximo	68.09	67.91	4.82	4.45

Deste modo, o controle avançado obteve uma redução na variabilidade de SiO<sub>2</sub> no PFF de aproximadamente 34%. A Figura 5 ilustra esta redução.



**Figura 5 – Teor de Fe e SiO<sub>2</sub> no PFF.**

## 4.2 Recuperação Mássica e Metalúrgica

A Tabela 3, apresenta os resultados do produto PFF dos separadores magnéticos.

As duas variáveis que o controle pode atuar que interferem nesse produto é a taxa de alimentação da planta, que não altera as recuperações, e a água adicionada nas peneiras, que interfere na porcentagem de sólidos da alimentação dos classificadores espirais.

A porcentagem de sólidos nos classificadores espirais altera seu corte e, conseqüentemente, varia a alimentação dos separadores. Porém essa adição de água é limitada pela capacidade da planta.

Para o PFF, onde o controle avançado atua ativamente no campo magnético, houve um ganho de recuperação mássica passando de 35,8% para 36,8% do ROM, o que significa um ganho com controle avançado de 2,84% na produção de PFF e 1,42% na recuperação mássica total, como mostrado na Tabela 2. A recuperação metalúrgica de PFF passou de 41,3% do ROM para 42,6%, o que representa um ganho de 3,17% na produção de PFF e 1,64% de ganho na recuperação metalúrgica total da planta.



**Tabela 3** – Resultados para o concentrado PFF

			<b>Média</b>	<b>Desv. Pad.</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	
<b>ROM</b>	% Fe	Operador	58.51	1.12	55.69	61.36	
		Controle	58.39	1.18	55.69	61.36	
	% SiO <sub>2</sub>	Operador	13.85	1.35	10.40	17.26	
		Controle	13.99	1.42	10.40	17.26	
	Massa	Operador	1842.74	42.39	1703.70	1953.70	
		Controle	1796.55	114.40	1412.77	2054.75	
	Rec.Mass	Operador	100.00	0.00	100.00	100.00	
		Controle	100.00	0.00	100.00	100.00	
	Rec.Metal	Operador	100.00	0.00	100.00	100.00	
		Controle	100.00	0.00	100.00	100.00	
	<b>PFF</b>	% Fe	Operador	67.4	0.35	66.1	68.1
			Controle	67.4	0.23	66.4	67.9
% SiO <sub>2</sub>		Operador	3.2	0.44	2.2	4.8	
		Controle	3.1	0.29	2.5	4.5	
Massa		Operador	659.0	31.95	4.0	719.9	
		Controle	659.5	21.84	534.4	713.3	
Rec.Mass		Operador	35.8	1.91	31.3	42.3	
		Controle	36.8	2.55	32.1	43.1	
Rec.Metal		Operador	41.3	2.48	35.7	48.0	
		Controle	42.6	3.27	36.7	49.7	

## 5 CONCLUSÕES

Com o OptSim<sup>®</sup> foi possível verificar o ganho obtido com a implantação do controle avançado no circuito de separação magnética. Foi comparado o controle avançado, utilizando regras especialista com inferência *fuzzy*, com o controle manual, representado por regras no especialista utilizando lógica *crisp*.

Os resultados mostraram que o controle avançado aumentou a qualidade do concentrado magnético, reduzindo a variabilidade do teor de SiO<sub>2</sub> em 34% em comparação com o controle manual.

Além do ganho de qualidade, houve ganho nas recuperações, tanto mássica quanto metalúrgica. O controle avançado teve um aumento estimado de recuperação de 2,84% em massa e 3,17% em recuperação metalúrgica em relação ao controle manual, o que representa um aumento de produção total da usina de 1,42% em massa e de 1,64% de aumento na recuperação metalúrgica.

Não foi possível, através da simulação, avaliar o impacto no controle de água de lavagem dos médios pela limitação do modelo utilizado no separador magnético. Mas, pela análise de processo, é possível inferir que esse controle melhoraria os resultados de recuperação.

## REFERÊNCIAS

- MARTINS, M. A. S.; MIRANDA, R. C.; SOUZA, J. B. Improving Performance. **World Cement**, July, 2009.
- BENVINDO DA LUZ, A.; Samapaio, J. A.; Almeida, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. 4ª Ed., Rio de Janeiro, 2004.

- 3 BROCHOT, S.; VILLENEUVE, J.; GUILLANEAU, J. C.; DURANCE, M. V.; BOURGEOIS, F. USIM PAC 3: Design and Optimization of Mineral Processing Plants from Crushing to Refining. **Mineral Processing Plant Design – Practice and Control**, Ed. A.L. Mular, D.N. Halbe & D.J. Barratt, SME, pp. 479-494, 2002.
- 4 FOURNOL, H. Méthodes de Calcul des Possibilités d'Épuration – Prévision ET Garantie des Résultats Industriels. Ver. Ind. Minérale, p. 5-19, June, 1974.
- 5 BRGM. **USIM PAC – Unit Operation Model Guide**. Orleans, 2007.
- 6 DOBBY, G.; FINCH, J. A. An Empirical Model of Capture in a High Gradient Magnetic Separator and Its Use In Performance Prediction. **XII IMPC**, São Paulo, Brazil, vol.I, p. 128-152, 1977.