

MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO UTILIZANDO FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL¹

*Alexis P. Yovanovic*²

*Daniel Henrique Dominguete Carvalho*³

*Emir Birro de Castro*⁴

*Farley Santos Ribeiro*⁵

*Eliézer Antonio Felipe*⁶

*Elder Marino*⁷

*Flávio Rezende de Jesus*⁸

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados obtidos com a utilização de um protótipo para um novo sistema de modelagem e otimização para o processo de flotação da usina de Vargem Grande, da empresa Minerações Brasileiras Reunidas. O sistema desenvolvido é composto por uma combinação interessante de técnicas de modelagem por engenharia de processo (Modelo Operacional) e de técnicas de inteligência artificial (Redes Neurais). O Modelo Operacional permite a realização de um “mapa metalúrgico” que indica os pontos de operação otimizados e ocorridos para o processo de flotação de sílica. Modelos neurais foram utilizados para estimar a movimentação de massa em função de diversas variáveis do circuito, como o nível de abertura das válvulas de descarga das colunas e a alimentação de ar, contribuindo para a aplicação da abordagem fenomenológica como uma representação do comportamento dinâmico da planta. Como resultados de produção, mediante a utilização do sistema otimizador, estima-se uma potencialidade de aumento de recuperação mássica de concentrado de ferro e também uma redução no consumo de reagentes. Outros diversos benefícios deste novo sistema otimizador são apresentados ao longo do trabalho.

Palavras-chave: Otimização, Flotação, Redes Neurais Artificiais.

¹Trabalho a ser apresentado no X Seminário de Automação de Processos, a ser realizado nos dias 4 a 6 de Outubro de 2006, em Belo Horizonte – MG.

²Engenheiro Civil-Químico, Diretor do Modelo Operacional – Otimização e Controle de Processos Mineraiis.

³Engenheiro Eletricista, M. Sc. , Departamento de Otimização da Arte & Byte Sistemas Ltda.

⁴ Engenheiro de Minas, M. Sc., Chefe de Departamento de Tratamento de Minérios da Mina do Pico da Minerações Brasileiras Reunidas S.A. - MBR

⁵Engenheiro de Minas, Complexo de Mineração Vargem Grande, Minerações Brasileiras Reunidas S.A.

⁶Engenheiro de Minas, Complexo de Mineração Vargem Grande, Minerações Brasileiras Reunidas S.A.

⁷Engenheiro Eletricista, Diretoria de Operações Elétrica e Automação, Minerações Brasileiras Reunidas S. A.

⁸Bacharel em Ciência da Computação, Departamento de Otimização da Arte & Byte Sistemas Ltda.

1 – INTRODUÇÃO

O trabalho apresenta os resultados obtidos com a utilização de um protótipo de um original sistema de modelagem e otimização, testado para o processo de flotação da usina de Vargem Grande, da empresa Minerações Brasileiras Reunidas. A solução desenvolvida e em processo de teste na usina, tem como objetivo principal a melhoria de recuperação mássica e metalúrgica do processo de flotação por meio da estabilização do processo e atitudes de controle que promovam a otimização dos resultados e consumo de insumos.

A abordagem utilizada para a realização desta solução apresenta um diferencial interessante diante das alternativas disponíveis no mercado para a modelagem e otimização de processos industriais. O trabalho consiste em uma integração dos benefícios de técnicas de inteligência artificial com os fundamentos fenomenológicos do processo em questão.

As bases fundamentais da engenharia de processos foram representadas pelo Modelo Operacional [1], que introduz como propriedade macrofenomenológica do processo de flotação uma relação entre a recuperação metalúrgica e a relação de concentração de massa da fase espuma, através da curva de seletividade.

A concentração de massa é consequência das condições operacionais do circuito de flotação e possível de ser estimada em função de algumas variáveis de processo, como a abertura das válvulas de descarga das colunas, a alimentação de ar, dentre outras. Por se tratar de um problema multivariado cuja realização de um modelo analítico apresenta certas dificuldades, a estimativa de concentração de massa foi elaborada por técnicas de inteligência artificial.

A estimativa de concentração de massa, realizada continuamente em função das variáveis de processo, possibilitou a extensão dos conceitos do modelo operacional para sua aplicação em tempo real, acompanhando a dinâmica do processo de flotação que pode ser representada por um ponto dentro de um mapa de operação, caracterizado pela recuperação metalúrgica (R) e concentração de massa do processo (Rcm).

A representação das condições operacionais da planta real dentro deste mapa de operação, em função das etapas envolvidas (2ª Lei do modelo) possibilita a avaliação do aproveitamento do processo bem como possibilidades de melhorias de resultados, que podem ser representados pelos pontos otimizados de operação.

A solução desenvolvida, que pôde ser avaliada em um sistema protótipo, como será apresentada nas seções seguintes, consiste de um sistema de suporte ao controle do circuito de flotação abordado. Este sistema oferece ao operador sugestões e informações relevantes para a otimização do processo em supervisão.

2 – METODOLOGIA

A etapa principal para a realização da otimização de processos é a identificação do comportamento operacional do processo de flotação real por um modelo matemático que possa representar as características do objeto de estudo, neste caso, o circuito de flotação 1 da usina de Vargem Grande da MBR.

O circuito analisado neste trabalho consiste de três colunas de flotação em arranjo conforme a Figura 1, onde se destaca a existência de uma carga circulante entre a etapa de *Rougher* e de limpeza de espuma (chamada de *Scavenger* nesta usina). O sistema também considerou a hipótese de operar sem a etapa *Scavenger*, onde esta última condição foi testada na usina de Vargem Grande.

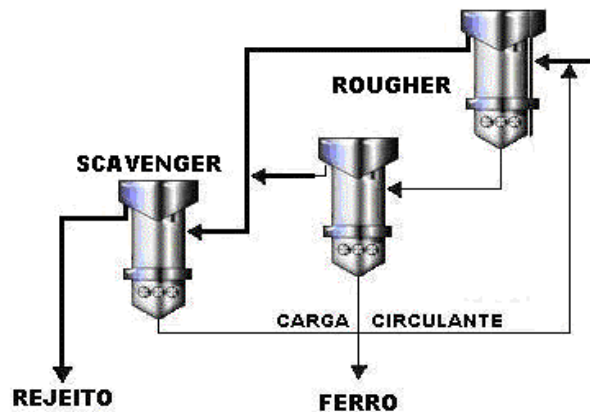


Figura 1 – Layout do circuito de flotação com limpeza de espuma

A partir da base de dados de determinadas variáveis de processo, armazenada em um sistema PIMS da usina, os resultados de produção deste circuito e as ferramentas de modelagem citadas anteriormente foi possível estabelecer um modelo matemático que representa a dinâmica operacional do processo real.

O passo inicial foi caracterizar a movimentação de massa em função destas diversas variáveis operacionais que atuam no circuito. Por meio de ferramentas de *Data Mining* para análise estatística e pela visão de engenharia de processos das variáveis disponíveis nesta base de dados foi possível estabelecer um modelo empírico para a estimativa da concentração de massa da etapa final do circuito.

O valor estimado de concentração de massa (R_{cm}) é dado por uma Rede Neural Artificial [2] que representa uma regressão multivariada não-linear. Esta regressão, gerada a partir da base de dados de processo, fornece à solução um valor contínuo de concentração de massa. Desta forma, o modelo desenvolvido realiza uma caracterização contínua do processo com base na curva de seletividade do circuito, introduzindo uma original forma de avaliação, nunca antes utilizada.

De posse da informação desta grandeza em tempo real, o Modelo Operacional, utilizando ferramentas fenomenológicas, é capaz de realizar todo o balanço mássico e metalúrgico do circuito bem como direcionar as atitudes operacionais de movimentação de massa, como por exemplo, a manipulação das válvulas de descarga para alcançar pontos ótimos de operação.

Os pontos ótimos a serem alcançados são apresentados no mapa de operação (Curva de Seletividade) da Figura 2, bem como o ponto de operação atual do processo e a representação do resultado da última bihorária.

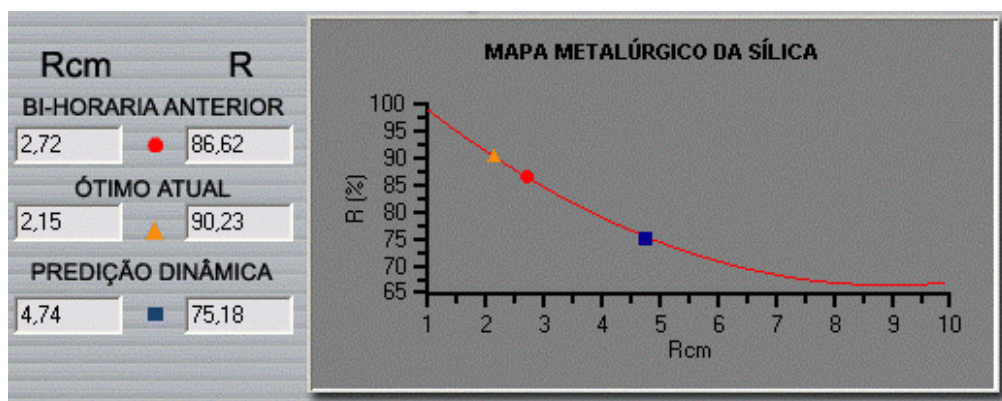


Figura 2 – Mapa metalúrgico de operação do circuito de flotação.

O mapa metalúrgico utilizado no sistema é constituído pela Curva de Seletividade Média da separação de sílica do minério de ferro, segundo a 1ª Lei do Modelo Operacional [1], para o circuito em questão. Esta curva pode ser ainda otimizada através de testes de laboratório, alterações no layout do circuito e pela estabilidade operacional. O ponto ótimo de operação é dado dinamicamente em função do teor de sílica objetivo no concentrado (1,5%) e do teor de sílica na alimentação, também estimado pelo sistema otimizador.

A diferença da localização do ponto de operação e o ponto ótimo atual é utilizada para a geração de sugestões de operação para que o sistema real se aproxime de sua condição otimizada no período avaliado (bi-horária). Estas sugestões são representadas por alterações de dosagem de reagentes, aberturas de válvulas de descarga, adição de água (no caso do circuito que inclui a etapa Scavenger), dentre outras, conforme ilustra a Figura 3 que representa a interface do protótipo de avaliação.

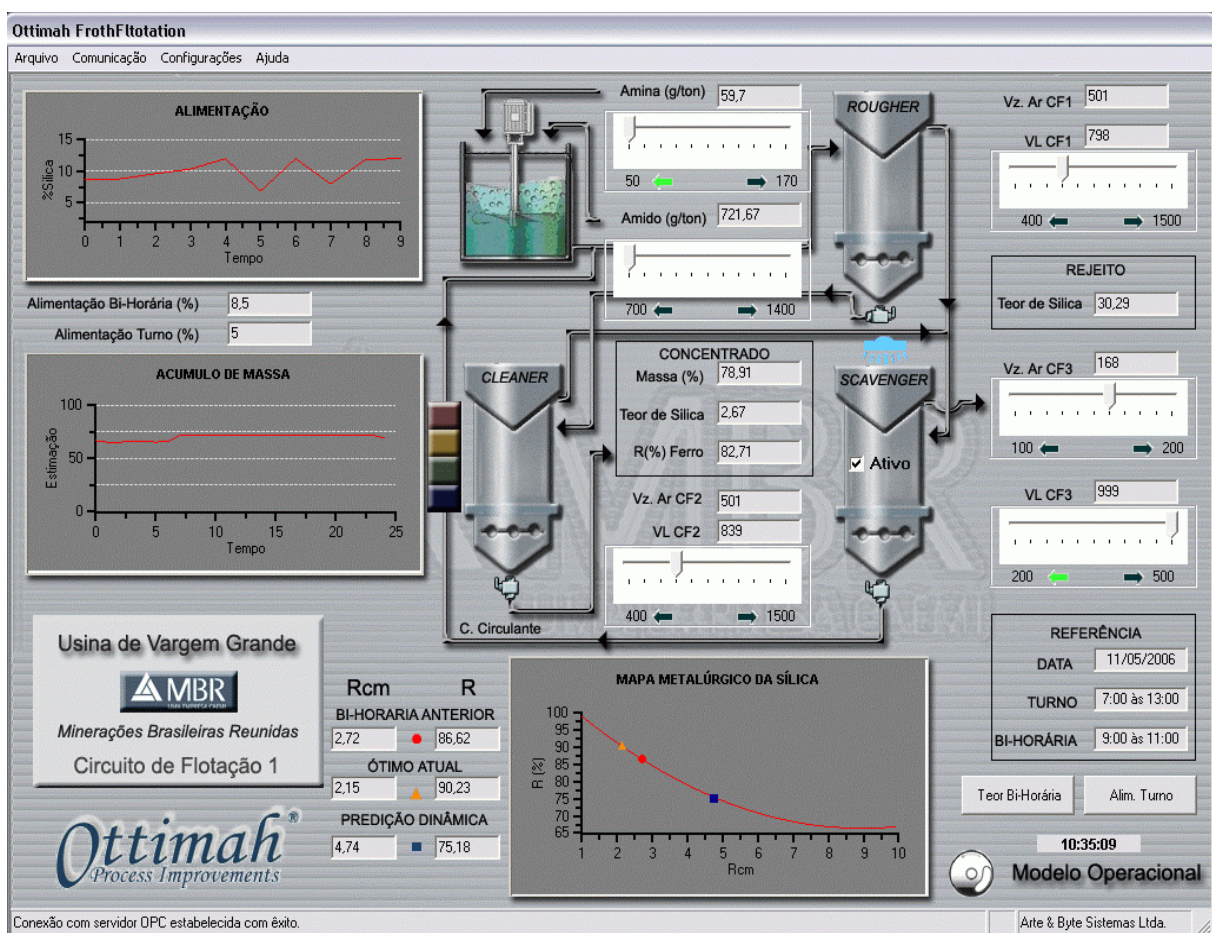


Figura 3 – Interface de operação do sistema protótipo de avaliação.

Além de promover a otimização dos resultados metalúrgicos através de sugestões de operação, foram atribuídas ao sistema outras funcionalidades relevantes para a manutenção do processo próximo do estado estacionário, como o acompanhamento do acúmulo de massa dentro do circuito e a estimativa de teor de sílica da alimentação.

A modelagem do processo de flotação possibilita a geração de um balanço *on-line* dos resultados metalúrgicos, representado pela estimativa dos teores de sílica no rejeito e concentrado, e recuperação mássica e metalúrgica de ferro.

3 - RESULTADOS

Durante os dias 18 e 19 de abril de 2006, o sistema de otimização desenvolvido foi utilizado para acompanhar a operação do circuito 1 de flotação da usina de Vargem Grande. O circuito operou durante 4 turnos (12 bi-horárias) com a assistência do sistema, um turno isolado e outros três turnos contínuos.

Os resultados do teste feito no circuito 1 foram comparados com o circuito 2 que operou com o mesmo minério, mas sem apoio do otimizador e ainda a comparação dos resultados do mesmo circuito quando operou sem ele.

O circuito de flotação, quando operado sob orientação do sistema de otimização, apresentou melhorias significativas, podendo vir a constituir uma importante ferramenta de apoio para o operador da usina. Os resultados do teste são resumidos na Tabela I abaixo. Os dados sombreados e em negrito correspondem à operação com o apoio do sistema desenvolvido.

Tabela I – Resultados específicos do teste de avaliação.

Data	Alimentação (%SiO ₂)	Concentrado %SiO ₂		Rejeito %SiO ₂ CIRC. 1	CONCENTRADO CIRC. 1	
		CIRC. 1	CIRC. 2 (*)		% MASSA	R(%) Ferro
18/04/06						
01 - 07 h	7,10	3,30	3,26	16,68	69,72	72,57
07 – 13 h	5,55	2,09	3,63	19,08	79,63	82,51
13 – 19 h	5,89	2,63	3,78	11,4	62,83	65,23
19 – 01 h	7,34	2,01	3,26	20,19	71,51	75,06
19/04/06						
01 - 07 h	10,65	2,12	3,15	19,91	52,06	57,26
07 – 13 h	8,10	1,60	2,68	16,56	56,56	60,55

(*) O Circuito 2 não possuía sistema de amostragem para acompanhar o teor do rejeito.

Na Figura 4 é ilustrada a curva de seletividade do circuito e os pontos de operação (R, Rcm) que representam os 6 turnos do teste indicados na Tabela II a seguir.

Tabela II – Pontos de Operação dos turnos do teste

Nº	Data	Ponto de Operação do Turno		
		R	Rcm	%SiO ₂ conc.
1	18.04.06 - 01 às 07 h (*)	66,68	3,52	3,30
2	18.04.06 - 07 às 13 h	69,96	4,91	2,09
3	18.04.06 - 13 às 19 h (*)	71,95	2,69	2,63
4	18.04.06 - 19 às 01 h	80,64	3,41	2,01
5	19.04.06 - 01 às 07 h	89,64	2,09	2,12
6	19.04.06 - 07 às 13 h	88,83	2,30	1,60

(*) Turnos operados sem o apoio do sistema de otimização.

Observa-se, na Figura 4 que o otimizador conduz rapidamente o processo para a estabilidade, representada por pontos de operação próximos da curva de seletividade. Após de atingir estabilidade, o sistema manteve o circuito operando próximo do ponto de operação otimizado pertencente a esta curva, garantindo maior seletividade e estabilidade para o processo.

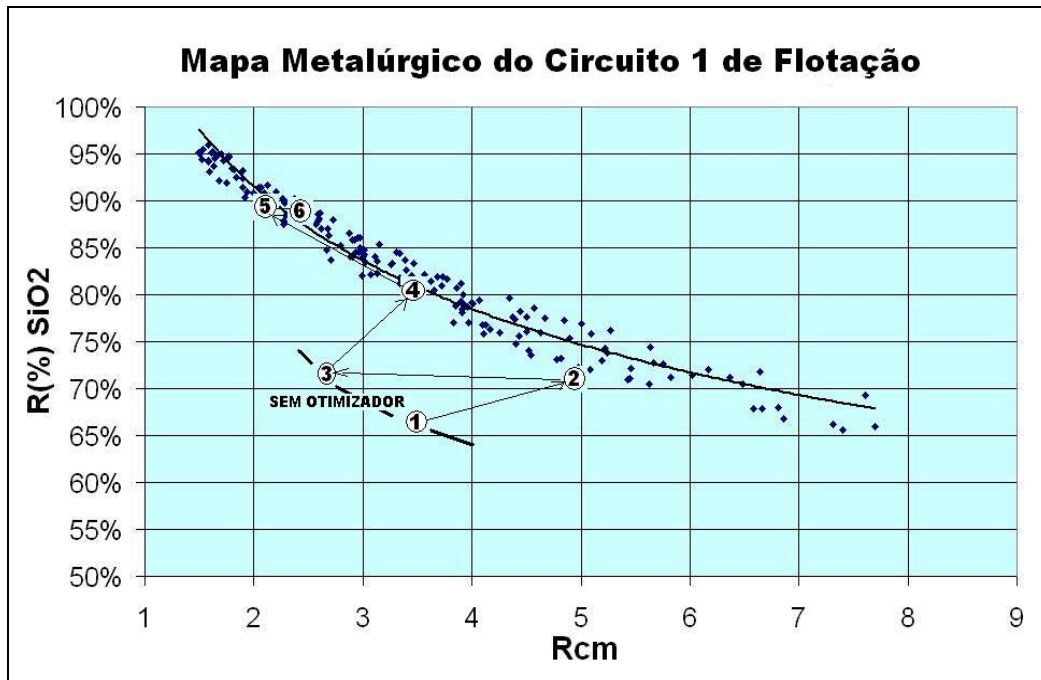


Figura 4 – Representação do teste de avaliação no mapa metalúrgico de operação.

Inicialmente a usina operava no ponto 1 quando se iniciou a utilização do sistema otimizador, o qual levou o ponto de operação do turno 2 para uma região próxima da curva de seletividade. O ponto 2 não atingiu totalmente o equilíbrio, pois a primeira bi-horária desse turno ainda operava sob o regime anterior. No turno 3, a operação da usina achou necessário retomar os critérios operacionais de praxe e optou por fechar o circuito 1, inclusive aumentando drasticamente as dosagens de amido, levando a Rcm de 4,91 para 2,69, que equivale a um movimento de 21,3% para 37,17% de massa na espuma, ou seja, “apressando” o circuito ao tentar reduzir o teor de sílica no concentrado.

Como se observa na Figura 4, o processo se distanciou da curva de seletividade e aumentou o teor de sílica no concentrado reduzindo em quase 17% a recuperação de ferro naquele turno (Tabela I). A operação com apoio do otimizador foi retomada no turno 4 quando o sistema orientou à suavização do circuito (Rcm de 2,69 para 3,41) e conduziu-o rapidamente para a curva de seletividade, como ilustrado pela posição do ponto 4, de modo que o teor de sílica no concentrado foi reduzido para 2,01%.

Acompanhando as sugestões do sistema otimizador com respeito ao gradativo aumento do teor de sílica na alimentação, foi sugerida uma redução drástica de Rcm (de 3,41 para 2,09) ao manipular quase 50% da massa pelo rejeito (turno 5). Como estas medidas foram tomadas dentro da curva de seletividade, os resultados metalúrgicos foram estáveis e foi possível contornar um drástico aumento de sílica na alimentação (de 7% para quase 12%) sem comprometer o teor de sílica no concentrado (2,12%). O processo prosseguiu no turno 6 com um Rcm de 2,3 e resultado de 1,6% de sílica no concentrado.

A partir dos resultados do teste de avaliação podem-se verificar as diversas melhorias possíveis de serem aplicadas ao circuito se o mesmo operar com o sistema de otimização desenvolvido.

3.1 - ESTABILIDADE

A Tabela III indica a variação observada no teor de sílica do concentrado final para os dois circuitos de flotação.

Tabela III – Teor de SiO₂ por bi-horária nos Concentrados

CIRCUITO	Mínimo	Médio	Máximo (*)
CIRCUITO 2	1,32	3,30	4,00
CIRCUITO 1	0,93	1,98	2,53

(*) “Golpe” de Sílica na Alimentação, de 7 para 12%.

Observa-se uma redução na variabilidade de resultados quando é utilizado o sistema otimizante. Este aspecto é de grande importância quando o concentrado não pode ser blendado oportunamente ou alimenta diretamente um sistema de pelotização.

3.2 – ANTECIPAÇÃO DE DISTÚRBIOS

O sistema permite acompanhar a variação do teor de sílica na alimentação, em cada bi-horária, o que constitui uma grande vantagem frente ao sistema atual, que opera apenas com um valor global do turno anterior, conhecido a cada 6 horas, ainda com 1 hora de atraso do laboratório.

No turno 1 do dia 19 de abril, por exemplo, aconteceu um “golpe” de sílica na alimentação, levando o teor de 7,3% para mais de 12% na última bi-horária (valor confirmado pela média de 10,7%). O circuito 1, orientado pelo sistema, acompanhou esta variação, mostrando valores crescentes entre as três bi-horárias. O circuito 2 apenas contou com a informação do turno anterior (7,34%). Os resultados são resumidos na Tabela IV a seguir.

Tabela IV – Resultados do Turno 1 (19 de Abril, 2006).

Bi-horária	CIRCUITO 1 (c/OTIMIZADOR)		CIRCUITO 2	
	Alimentação Prevista (% SiO ₂)	Concentrado %SiO ₂	Alimentação Prevista (% SiO ₂)	Concentrado %SiO ₂
01 - 03 h	8,5	1,95	7,34	2,8
03 – 05 h	10,2	2,00		2,86
05 – 07 h	12,3	2,42		4,0
TURNO 1	10,65	2,12	10,65	3,15

Outros distúrbios ocorreram durante a operação, onde se destacam duas paradas completas da usina, três quedas parciais de alimentação por perda de densidade na alimentação, três paradas de alimentação de reagentes, trocas de reagentes (de tambor para granel e de granel para tambor) e um entupimento de coluna, mas o sistema otimizante manteve o circuito dentro da estabilidade.

3.3 – BALANÇO ON-LINE

O acompanhamento do balanço de massas e metalúrgico, em tempo real, constitui uma ajuda inestimável para o operador da usina, permitindo a tomada de decisões em tempo real e a análise de “sensibilidade” do processo com relação às diversas medidas tomadas e suas respostas no circuito.

3.4 – VELOCIDADE DE RESPOSTA

O protótipo do sistema de otimização desenvolvido mostrou que demora poucos minutos para informar ao operador sobre a posição dos pontos de operação, inclusive em períodos de retomada do circuito depois de paradas emergenciais. Uma ou duas bi-horárias são necessárias ao sistema para estabilizar e apresentar resultados, permitindo operar em condições adversas, como indicado no item 3.2.

3.5 – CONSUMO DE REAGENTES

O otimizador sugere ao operador a dosagem ótima de reagentes em cada instante visando não apenas a redução de consumo como também o incremento de seletividade no processo. Esta redução surge do conhecimento do histórico de operação da usina, onde as oportunidades de melhoria foram identificadas pelo modelo e sugeridas ao operador, a cada instante. Estudos de laboratório devem ser executados, posteriormente, para completar a otimização definitiva destes consumos.

3.6 – PERFORMANCE METALÚRGICA

Como consequência dos benefícios anteriores, o operador da usina poderá ser orientado a explorar a maximização de performance permitida pelo processo. Na Figuras 5 e 6 são ilustradas, por exemplo, as curvas de seletividade médias e a relação de recuperação metalúrgica dos períodos de julho a dezembro de 2005 e de janeiro a março de 2006, no Circuito 1 da usina. A melhoria operacional entre ambos os períodos é dimensionada observando os valores teóricos de recuperação de massa e de ferro que tivessem sido obtidos no caso de ter operado o Circuito 1 permanentemente nas condições otimizadas permitidas pela usina, ou seja, dentro da curva de seletividade média de cada período.

Os dados representados são todos valores efetivos de produção, realizados pela competência da equipe de processos de usina, atingindo uma significativa melhoria de performance em 2006.

O mérito do sistema otimizante é descobrir estas potencialidades, em suas diversas formas, conduzir o processo até estas condições otimizadas com fundamentos fenomenológicos em tempo real e mantê-lo operando nestes valores.

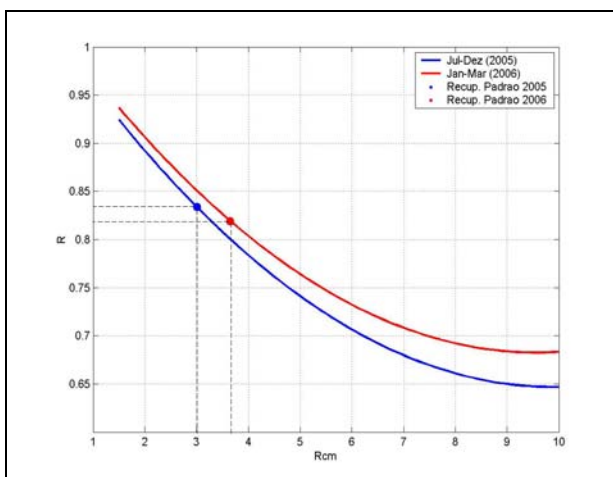


Figura 6 – Curvas de Seletividade

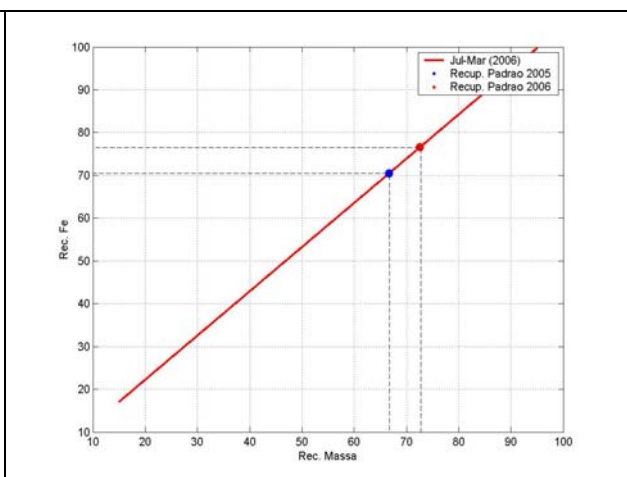


Figura 7 – Recuperação no Concentrado

O cálculo que deve ser feito para uma correta avaliação é o seguinte:

- Estabelecer condições equivalentes de alimentação e de qualidade do produto para todas as condições avaliadas. Neste caso se utilizará uma alimentação média de 6% SiO₂ e um concentrado com 1,5% SiO₂.
- Verificar, na respectiva curva de seletividade de cada período avaliado, qual par de valores (R_o, Rcm_o) que atende aos requisitos anteriores. Este par de valores corresponde ao ponto de operação ótimo para cada situação:

$$c = 1,5 = [6,0 (1 - R_o)] / [1 - (1/Rcm_o)]$$

- Obtido o valor de Rcm_o, é possível então determinar a recuperação de massa pelo concentrado ($M = 100 - (100 / Rcm_o)$) para cada condição.
- Na relação de recuperação de ferro em função da massa (Figura 7), que se apresenta com uma boa aproximação linear quando todos os pontos possuem valores próximos de 1,5% de sílica no concentrado, é obtida a recuperação líquida de ferro para cada condição de seletividade. Estes valores podem então ser comparados, numa mesma base de avaliação.

No exemplo anterior, pelas Figuras 6 e 7, se observa que, operando sob a condição de maior seletividade (curva superior), maior recuperação de Ferro pode ser obtida, mantendo a qualidade do produto.

Existe, portanto, uma grande potencialidade de ganho de maior recuperação de ferro caso o processo melhore a sua seletividade geral e que, com apoio do sistema otimizante, opere a maior parte do tempo dentro da sua curva de seletividade. A utilização deste sistema, durante um período mais extenso, poderá corroborar estas conclusões preliminares e quantificar os ganhos efetivos, que parecem ser muito significativos.

Na Figura 8 se observa a seletividade geral da usina, com base nos pontos de operação de turnos para o segundo semestre de 2006, onde se observa a instabilidade operacional da usina, pela falta de um sistema como o apresentado.

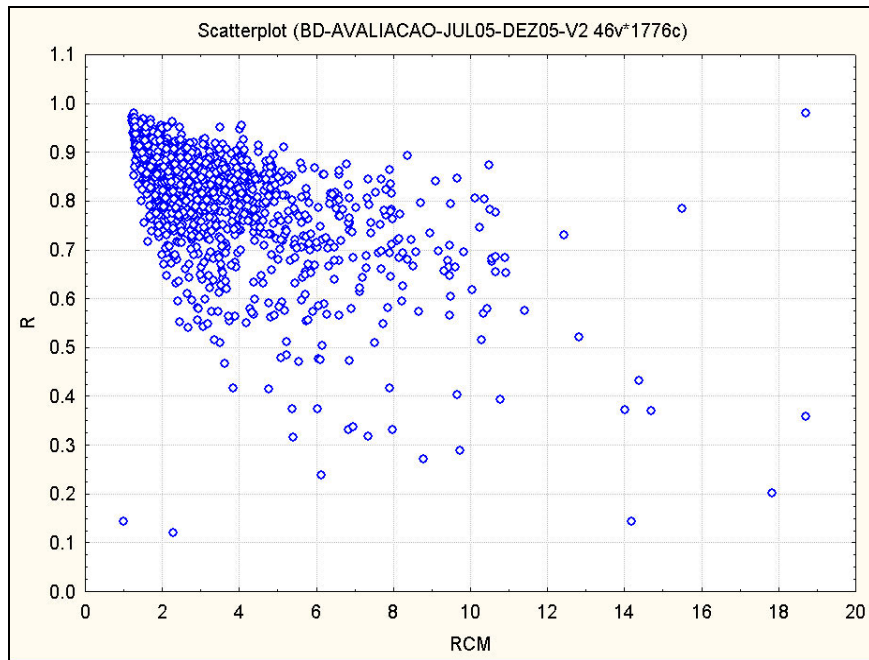


Figura 8 – Variabilidade Operacional Circuito 1 de Flotação

5. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma nova metodologia para o controle otimizante de processos de flotação e os resultados obtidos com um protótipo deste sistema num teste industrial. Os benefícios possíveis de serem obtidos, com sua utilização no Circuito 1 de flotação da usina de Vargem Grande da empresa Minerações Brasileiras Reunidas, são significativos. Destaca-se a originalidade do aplicativo e a utilização das mais modernas tecnologias de inteligência computacional e de engenharia de processos.

6. AGRADECIMENTOS

Vale salientar, como aspecto chave na obtenção dos resultados deste trabalho, a ajuda significativa fornecida pelos operadores e técnicos da usina de Vargem Grande, durante todo o processo de pesquisa e, principalmente, durante o período de teste. Valiosas sugestões feitas pelos operadores serão devidamente incorporadas no sistema otimizante, na sua implantação definitiva dentro da usina.

7. REFERENCIAS

- [1] YOVANOVIC, A.P., **Engenharia da Concentração de Massa por Flotação. Volume 1: Fundamentos da Flotação**, 2004, Belo Horizonte, Editado por A. Yovanovic.
- [2] HAYKIN, S. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. NY : Macmillan, 2001.