

# APLICAÇÃO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA CONTROLE DAS FLOTAÇÕES DE FÁBRICA NOVA E TIMBOPEBA<sup>1</sup>

Cezar Gonçalves da Silva<sup>2</sup>

Elismar Miquelanti<sup>3</sup>

Marcílio do Carmo Silva<sup>4</sup>

Marco Aurélio Soares Martins<sup>5</sup>

Siderlei Carvalho Ribeiro Santos<sup>6</sup>

## Resumo

O processo de flotação das usinas de Fábrica Nova (FN) e Timbopeba (TO) têm a finalidade de concentrar a fração fina natural (< 0,15 mm). Essa fração é concentrada em células mecânicas ou colunas em quatro etapas de flotação: *rougher*, *cleaner*, *re-cleaner* e *scavenger*. O concentrado final é produzido na etapa *cleaner* em Fábrica Nova e *re-cleaner* em Timbopeba. O rejeito final de ambas as flotações na etapa *scavenger*. A implantação do Sistema Especialista da Flotação é um exemplo de inserção de novos modelos de Gestão no processo unitário de flotação, que consiste em novas tecnologias na camada de Automação e Controle de Processos.

**Palavras-chave:** Flotação; Sistema especialista e gestão.

## APPLICATION EXPERT SYSTEM FOR CONTROL OF FLOTATION OF FÁBRICA NOVA AND TIMBOPEBA

## Abstract

The process of flotation plants Fábrica Nova (FN) and Timbopeba (TO) are intended to concentrate the natural fine fraction (< 0.15 mm). This fraction is concentrated in mechanical cells or columns in four stages of flotation, rougher, cleaner, and scavenger re-cleaner. The final concentrate is produced by cleaner in Fabrica Nova and re-cleaner step in Timbopeba. The residuals of the final stage in both flotations scavenger. The implementation of the Flotation Expert System is an example of insertion of new models of management in the process of flotation unit, which consists of new technologies in the layer of Automation and Process Control.

**Key words:** Flotation; Management expert system.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Eng. de Processos Vale Timbopeba. [cezar.goncalves@vale.com](mailto:cezar.goncalves@vale.com)

<sup>3</sup> Analista de Processos Vale Timbopeba. [elismar.miquelanti@vale.com](mailto:elismar.miquelanti@vale.com)

<sup>4</sup> Técnico Especializado de Produção Vale Timbopeba. [marcilio.silva@vale.com](mailto:marcilio.silva@vale.com)

<sup>5</sup> Engenheiro de Minas CEMI Engenharia Diretor de Operações. [marco@cemi.eng.br](mailto:marco@cemi.eng.br)

<sup>6</sup> Eng. de Automação Vale Timbopeba. [siderlei.santos@vale.com](mailto:siderlei.santos@vale.com)

## 1 INTRODUÇÃO

A Mina de Timbopeba está localizada no município de Ouro Preto (MG) e iniciou suas operações em 1984. A planta de beneficiamento trata o minério lavrado na mina de Fábrica Nova. Anualmente são produzidas, em regime ininterrupto, cerca de 12,6 milhões de toneladas de produtos. Estes produtos são classificados de acordo com a granulometria como granulados, *sinter feed* ou *pellet feed*. A produção é transportada por ferrovia para indústrias siderúrgicas e unidades portuárias da Vale. O processo de flotação das usinas de Fábrica Nova (FN) e Timbopeba (TO) têm a finalidade de concentrar a fração fina natural (< 0,15 mm) e o produto da moagem do rejeito da concentração magnética de média intensidade e dos Itabiritos de Fábrica Nova. Após a deslamagem em hidrociclones, essa fração é concentrada em células mecânicas ou colunas em quatro etapas de flotação: *rougher*, *cleaner*, *re-cleaner* e *scavenger*. O concentrado final é produzido na etapa *cleaner* em Fábrica Nova e *re-cleaner* em Timbopeba. O rejeito final de ambas as flotações na etapa *scavenger*. A busca permanente pela otimização dos processos de Tratamento Mineral na Vale tem gerado ações contínuas para melhorar a performance das usinas. A implantação do Sistema Especialista da Flotação é um dos exemplos da inserção de novos modelos de Gestão no processo unitário de flotação, que consiste em novas tecnologias na camada de Automação e Controle de Processos, conhecidos como inteligência artificial.

Dentre as técnicas de inteligência artificial para controle avançado de processos minerais, destaca-se a eficiência dos sistemas especialistas associados à lógica “nebulosa” ou “difusa” (*Fuzzy Logic Control*) como uma ferramenta muito eficaz para alcançar condições otimizadas para o processo. Estes sistemas são baseados em conhecimento construídos - principalmente com regras que reproduzem a experiência humana. Normalmente, são utilizados para solucionar determinados problemas em domínios específicos. Associado a este está O *OptVison Froth* que é um método de análise de imagens para inferir medidas importantes flotação para o adequado controle dos processos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto Sistema Especialista das flotações de Fábrica Nova e Timbopeba consiste na implantação dos sistemas *OptVision Froth™* (sistema de visão), para medição *on line* de propriedades da espuma de transbordo e do sistema *OptProcess* (sistema otimizador), para o controle otimizado dos processos. O sistema, através da estratégia de controle adotada, tomará decisões em relação à velocidade da espuma, níveis de caixa, dosagens de reagentes e tendência dos resultados das flotações gerando automaticamente decisões enviadas diretamente para o controle regulatório, e também alarmes inteligentes associados com mudanças e/ou situações anormais.

Em Fábrica Nova foram instaladas sete câmeras para captura de imagem da espuma na flotação (Figura 1).

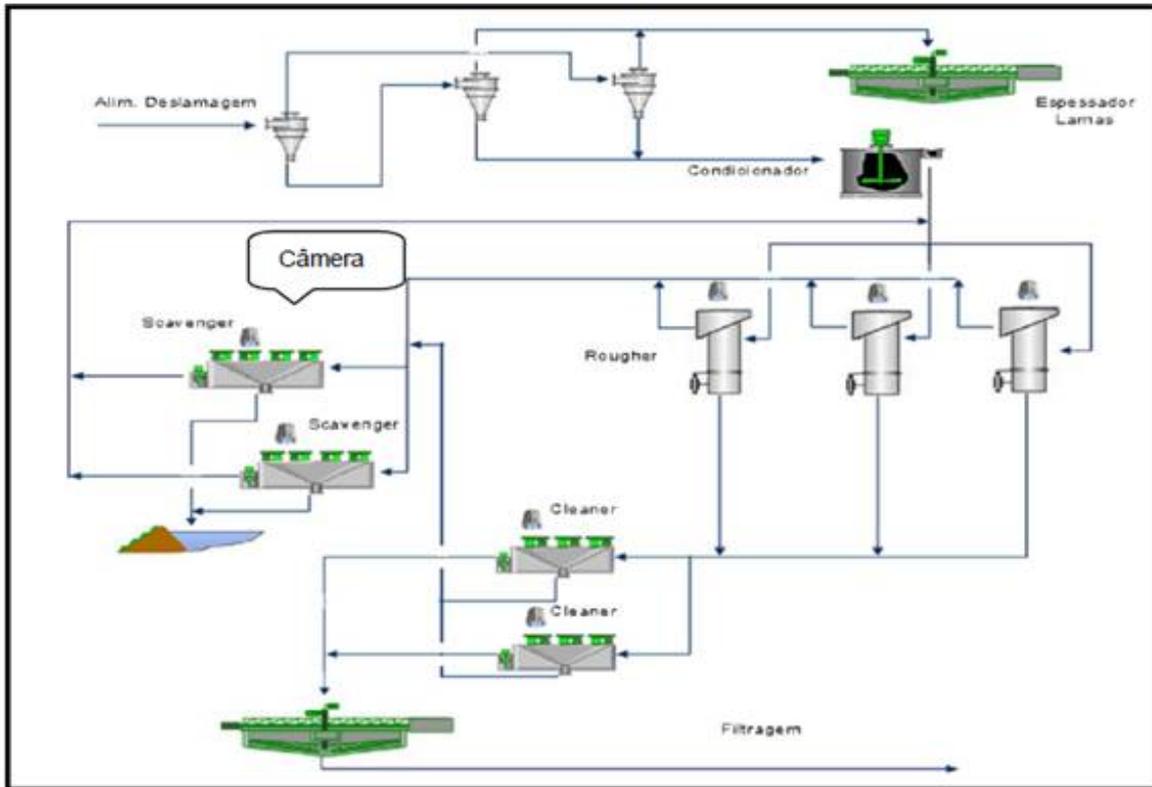


Figura 1. Circuito de Flotação de FN.

No circuito de flotação de Timbopeba foram instaladas 12 câmeras (Figura 2).

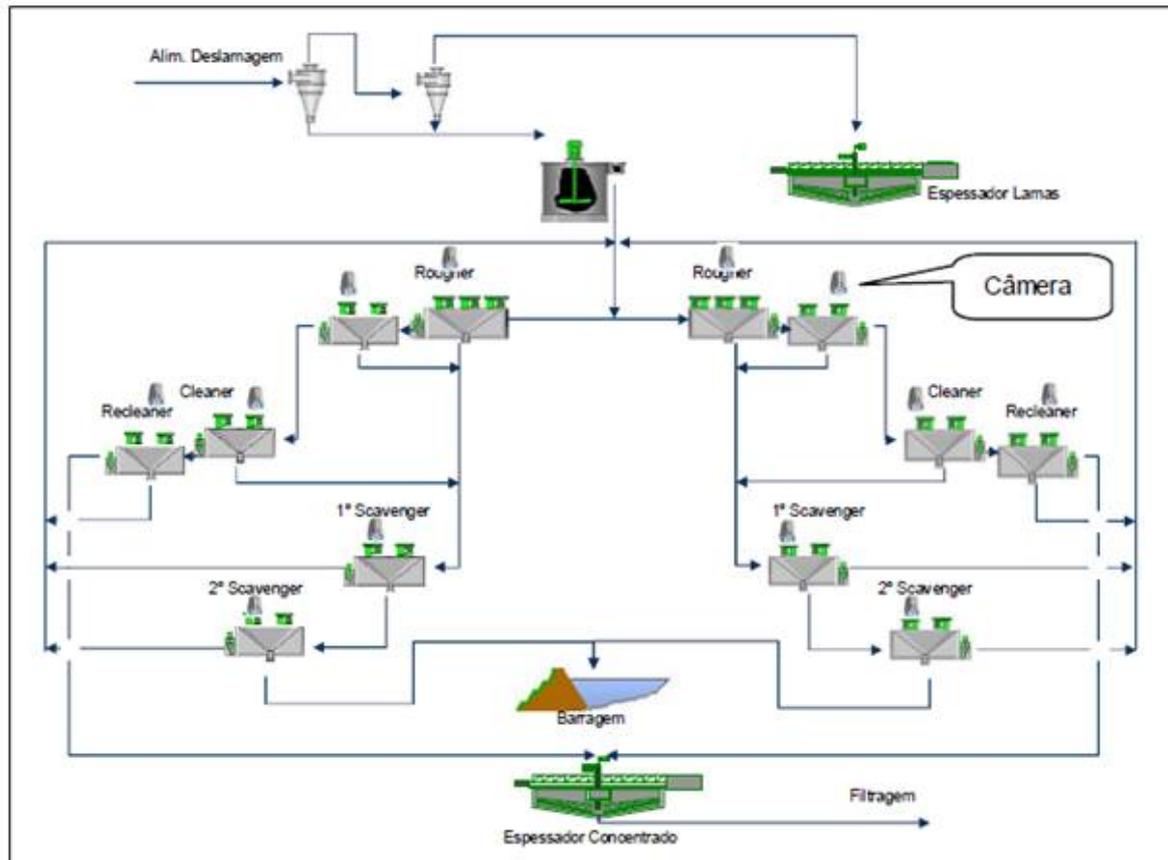


Figura 2. Circuito de Flotação de Timbopeba.

## 2.1 Conceito de Sistema de Visão

Segundo a Cemi Engenharia (2009) a tecnologia *OptVision Froth®* é uma tecnologia de análise de imagens avançada, para medição *on line* de propriedades da espuma de flotação. O sistema *OptVision Froth®* consiste primariamente de câmeras e iluminação a *LED* ( *light emitting diode* ) Instaladas acima nas células de flotação, transmissão das imagens por fibra ótica e remotamente conectadas a um ou mais computadores, que analisam as imagens provenientes das câmeras de forma *on line*, com o software *OptVision Froth®*. A montagem das câmeras e da iluminação é feita diretamente sobre a célula de flotação, dentro da borda da mesma. O computador para processamento é geralmente localizado na sala de controle da usina. Sistemas para análise de visão de espuma se tornaram parte integrante de plantas de flotação, onde fornecem benefícios substanciais.

## 2.2 Conceito do *OptProcess*

De acordo com a Cemi Engenharia (2009) o *OptProcess®* é um software para soluções em controle avançado. O sistema permite a criação de aplicações de controle avançado para, virtualmente, qualquer tipo de processo. Sua estrutura atende as demandas industriais permitindo um controle avançado robusto e equilibrado. Em um processo, o sistema de controle avançado, em principio, suplementa os Sistemas de Controle Distribuído (DCS) convencionais ou os Controladores Lógicos Programáveis (PLC). O sistema é capaz de interpretar automaticamente as informações a partir do banco de dados do PLC ou do DCS, utilizando várias técnicas avançadas para elaborar novos *set-points* várias vezes por minuto. Estes *set-points* são comumente aplicados/enviados ao PLC ou DCS de forma automática, usualmente sem necessidade de nenhuma ação dos operadores e visam continuamente objetivos estratégicos. Eles mantêm a qualidade requerida do produto, enquanto perseguem objetivos técnicos e econômicos. A modelagem do sistema pode se basear em modelos físicos matemáticos, na experiência e conhecimento humano, ou em bancos de dados estatísticos, integrados em um único ambiente. O sistema oferece uma forma efetiva e flexível de modelar e controlar diferentes processos, incluindo problemas associados com a agregação e análise de informação e tomada de decisão.

## 2.3 Sistema Especialista e Lógica Nebulosa

Segundo a Cemi Engenharia (2009) o sistema *OptProcess®* dispõe de uma máquina de inferência abrangente e um ambiente intuitivo para o desenvolvimento de regras para o sistema especialista, incluindo regras que utilizam lógica *fuzzy*. A base de conhecimento pode ser utilizada tanto para aplicações de controle como para aplicações de tomada de decisão. Com a utilização desse módulo, é possível alimentar o sistema com um conjunto considerável de regras (*fuzzy ou crisp*) criando assim uma base de conhecimento extensa que representa o conhecimento de especialistas em um determinado domínio. A base de conhecimento construída apresenta grandes facilidades de manutenção devido a sua estrutura de visualização. Esse módulo também possibilita a criação de alarmes avançados e o processamento de mensagens para os usuários. O conhecimento humano e a essência da estratégia de controle são tipicamente capturados neste módulo, construído em torno de uma base de conhecimento e um eficiente mecanismo de

inferência. É a parte central da maioria das aplicações. Com base no know-how dos engenheiros da planta, metalurgistas e operadores, combinado com a experiência do fornecedor do software, este módulo reage sutilmente ou drasticamente a mudanças na alimentação da planta ou no comportamento do processo. Ele está preparado para lidar com incertezas e com situações confusas ou não totalmente determinadas. O módulo especialista analisa dados de entrada provenientes da planta assim como dados provenientes de outros módulos (painéis sinópticos, sensores virtuais, ferramentas estatísticas, etc) e toma decisões. Ele pode decidir, por exemplo, substituir uma medição inconsistente por uma estimativa do *Soft Sensor*. As “decisões” são graficamente mostradas em tempo real e, por um simples “click” em curvas de tendência, é possível encontrar o que foi feito em um dado momento e por quê. As regras incluem regras com lógica convencional (*crisp*) e regras por lógica *fuzzy*. No *OptProcess*® regras com lógica *fuzzy* são tão fáceis de serem implementadas e mantidas quanto às regras convencionais. Elas são particularmente úteis em casos nos quais um determinado *set-point* deve ser cuidadosamente modificado, com base em fatos que, por essência, freqüentemente não são totalmente verdadeiros nem totalmente falsos. As regras são editadas e mostradas usando uma interface gráfica, semelhante a uma janela hierárquica do *Windows Explorer* (usada para mostrar o drive e a árvore de diretórios). O sistema constrói e mostra a árvore de inferência associada a uma base de conhecimentos, permitindo o traçado da lógica e a resolução de problemas.

## 2.4 Ferramentas Estatísticas

De acordo com a Cemi Engenharia<sup>(1)</sup> o módulo inclui uma variedade de funções estatísticas (histogramas, médias móveis, filtros, gradientes etc.) que podem ser aplicados a qualquer uma das medidas ou variáveis calculadas do sistema. Os resultados das estatísticas podem ser utilizados na base de conhecimento (regras *fuzzy* ou *crisp*) e estão disponíveis para os demais módulos do sistema. O módulo de estatística gera informações estatísticas *on line* sobre o processo e dispõe de um objeto de visualização, que possibilita a apresentação de gráficos de uma forma visual e flexível e pode ser utilizado para avaliação do desempenho da planta. A escolha de funções estatísticas é ampla e permite uma grande flexibilidade para pré-processamento de dados.

## 2.5 Regras Aplicadas no Sistema Especialista de FN/TO

Para as flotações foram criadas e configuradas regras, entre as quais estão as de inicialização, validação dos instrumentos, estado do processo, controle e aplicação de *set points*. Abaixo o princípio de funcionamento da lógica para sílica no concentrado.

Como ocorre o controle para sílica no concentrado.

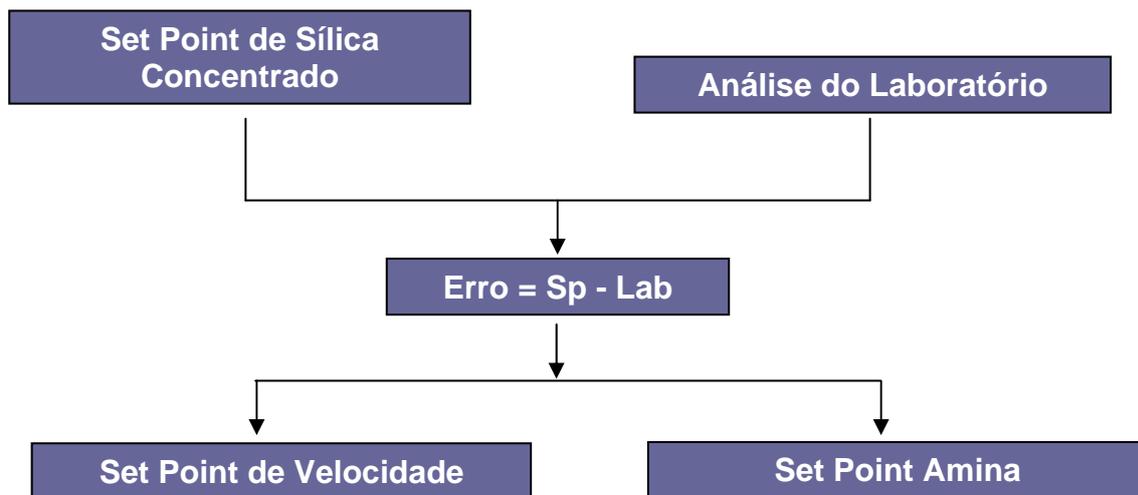


Figura 3. Lógica para sílica no concentrado.

A cada novo resultado de laboratório:

- se sílica alta, aumenta velocidade e aumenta amina; e
- se sílica baixa, diminui velocidade e diminui amina.

Variável controlada:

- teor de sílica concentrado final;
- *set point* fornecido pelo operador no HMI; e
- valor de processo é dado pelo laboratório pelo LIMS ou pelo operador no HMI.

Variável manipulada:

- velocidade de transbordo e dosagem de amina;
- cada coluna ou célula tem seu próprio *set point* de velocidade; e
- *set point* alterado a cada resultado de laboratório.

Como ocorre o controle para ferro no rejeito.

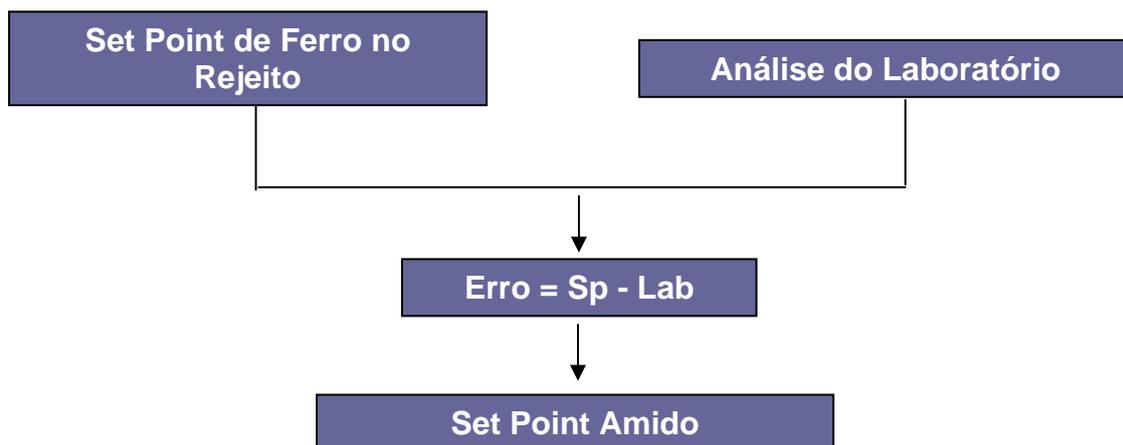


Figura 4. Lógica para ferro no rejeito.

A cada novo resultado de laboratório:

- se ferro no rejeito alto, aumenta amido de milho; e
- se ferro no rejeito baixo, diminui amido de milho.

Variável controlada:

- teor de ferro no rejeito final;
- *set point* fornecido pelo operador no HMI; e
- valor de processo é dado pelo laboratório pelo LIMS ou pelo Operador no HMI.

Variável manipulada:

- dosagem de amido de milho; e
- *set point* alterado a cada resultado de laboratório.

Como ocorre o controle para as velocidades de transbordo.

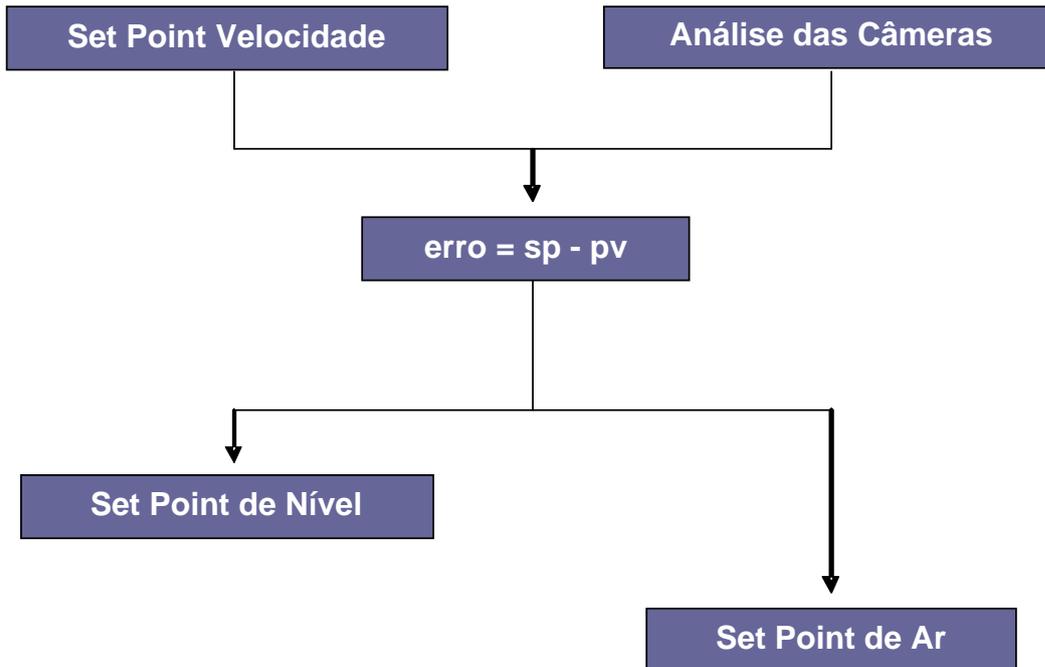


Figura 5. Lógica para controle de velocidades.

A cada 5 minutos, ou seja, 10 ciclos de 30 segundos.

- se velocidade alta, aumenta interface ou reduz ar; e
- se velocidade baixa, diminui interface ou aumenta ar.

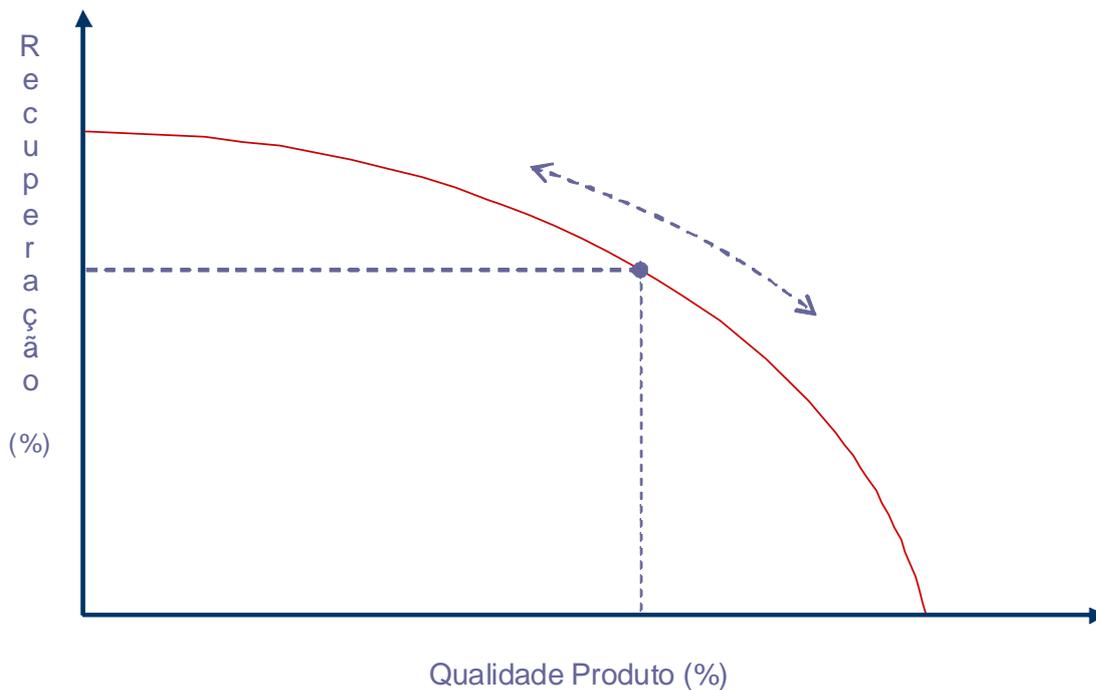
Variável Controlada:

- velocidade da espuma;
- *set point* determinado pelo OptProcess; e
- valor de processo é dado pelas OptVision Froth.

Variáveis Manipuladas:

- nível de espuma e vazão de ar;
- atuação prioritária no nível e depois no ar; e
- *set point* alterado a cada 5 minutos.

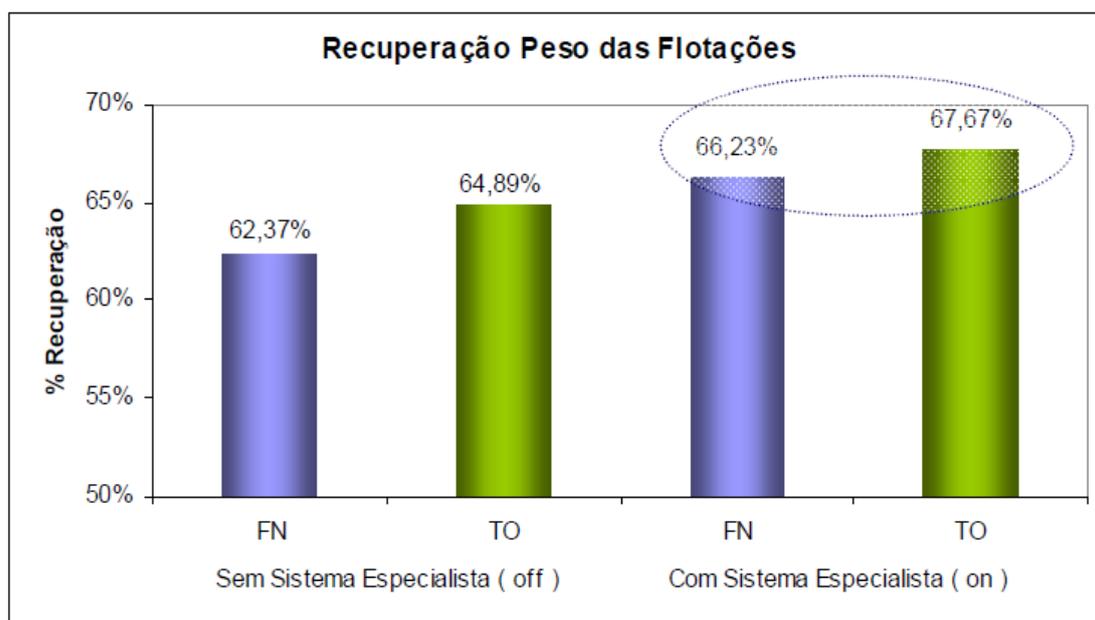
A busca pela recuperação máxima da flotação é um dos objetivos principais, porém essa estratégia visa atender a especificação do concentrado (Figura 6).



**Figura 6.** Qualidade x Recuperação.

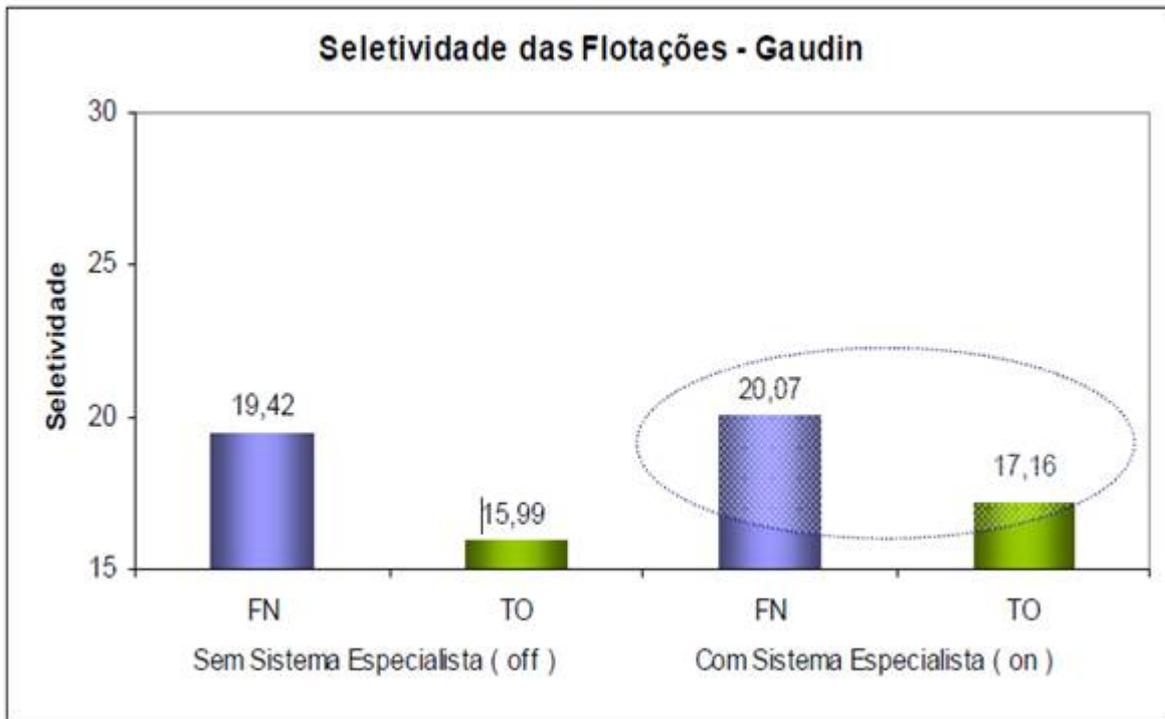
### 3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo controle mostram o desempenho do sistema especialista das flotações e o potencial do mesmo, visto que tivemos uma redução de 0,56 pp (pontos percentuais) e 1,5 pp (pontos percentuais) no teor de Fe do rejeito das flotações de Fábrica Nova e Timbopeba, respectivamente. No período de operação obtivemos um aumento de 3,86 pp (pontos percentuais) e 2,78 pp (pontos percentuais) nas recuperações em peso das flotações de Fábrica Nova e Timbopeba sem afetar a qualidade dos produtos (Figura 7).



**Figura 7.** Evolução do Rendimento das flotações.

A seletividade das flotações, demonstraram o aumento de 0,65 pp (pontos percentuais) em Fábrica Nova e 1,17 pp (pontos percentuais) em Timbopeba no período em que o sistema estava controlando (Figura 8).



**Figura 8.** Evolução da seletividade das flotações.

#### 4 CONCLUSÕES

O Sistema Especialista das Flotações de Fábrica Nova e Timbopeba gerou um aumento de 3,86 pp (pontos percentuais) e 2,78 pp (pontos percentuais), respectivamente, nas recuperações em peso das flotações, sem afetar a qualidade do *pellet feed*. Com o aumento da seletividade das flotações projetou-se um aumento em massa de *pellet feed* produzida ano, além disso, a operação do Sistema Especialista reduziu as variabilidades operacionais entre os turnos, ou seja, padronização das mesmas. Outro fato importante é a sinalização do sistema em relação à dosagem de reagentes, visto que o mesmo demonstra um potencial para otimização das dosagens dos mesmos nas flotações.

#### REFERÊNCIAS

- 1 BALTAR, C.A.M. Flotação no tratamento de minérios. Recife: Universitária da UFPE, 2010. Arquivo Interno: Proposta Técnica Comercial CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia. Junho de 2009.