

# UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE OTIMIZANTE (SISTEMA ESPECIALISTA) NA BUSCA DO CONTROLE DE DENSIDADE DE POLPA DE ESPESSADORES<sup>1</sup>

*Henrique Gustavo da Silva<sup>2</sup>  
Antonio Lucas de Medeiros Silva<sup>3</sup>  
Keulla Venya Urbano e Silva<sup>4</sup>  
Jose Marcelo de Carvalho Nunes<sup>5</sup>*

## Resumo

Na última década, o número de aplicações industriais que fazem uso de elementos da inteligência artificial (IA), cresceu exponencialmente. Os avanços tecnológicos no processamento computacional e um maior conhecimento, por parte do setor industrial da tecnologia da IA, propiciaram o surgimento de aplicações que substituíram, parcialmente ou integralmente, a operação humana em uma série de processos industriais. Os benefícios da utilização dessa tecnologia são evidentes: maior confiabilidade na operação, menor tempo de resposta, otimização e ausência de stress operacional. Considerando-se isso, a indústria de beneficiamento mineral vem fazendo uso dos benefícios oriundos do emprego dessa tecnologia. Em particular, é importante ressaltar que a mesma constitui um campo fértil de aplicações para a IA. Sistemas de controle otimizantes determinam continuamente e implementam “set points” otimizados, que refletem uma estratégia de controle selecionada, mantendo a qualidade requerida do produto e fazendo com que objetivos técnico-econômicos sejam alcançados. Isto resulta em um aumento de capacidade, melhor controle de qualidade do produto e/ou em um decréscimo nos custos de produção. Após uma breve comparação entre as técnicas convencionais de controle e a utilização de sistemas de controle otimizantes, é feita uma análise crítica sobre controle baseado em modelos, utilização de redes neurais e controle especialista com lógica nebulosa ou “fuzzy”. Neste trabalho é apresentado um sistema de controle, que usa elementos da inteligência artificial, Lógica FUZZY e Sistemas Especialistas para o controle de densidade de polpa de espessadores de pellet-feed em Carajás. No presente caso abaixo, o conhecimento dos operadores experientes, sobre determinados domínios do processo de beneficiamento mineral, foi transferido para o sistema de controle. Com isso, o mesmo ficou preparado para responder às circunstâncias operacionais a ele impostas, da mesma forma que um experiente operador o faria, porém de forma mais rápida, menos susceptível a erros e imperfeições. Atualmente o sistema de controle está trabalhando e sendo aplicado nos seguintes pontos: controle e aumento da densidade do espessador de concentrado; controle de balanço de massas do espessador de concentrado; minimizar corte de alimentação da moagem de bolas, e Carajás; proteção do espessador de concentrado.

**Palavras-chave:** Sistema especialista; Carajás; Estratégia; Densidade.

<sup>1</sup> *Contribuição Técnica ao 60º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte - MG.*

<sup>2</sup> *Técnico de controle de processos, CVRD Serra dos Carajás - PA.*

<sup>3</sup> *Técnico de controle de processos, CVRD Serra dos Carajás - PA.*

<sup>4</sup> *Técnico de controle de processos, CVRD Serra dos Carajás - PA.*

<sup>5</sup> *Técnico de controle de processos, CVRD Serra dos Carajás - PA.*

# 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas especialistas constituem um campo muito promissor da Inteligência Artificial (IA), e nada mais são que técnicas computacionais que incorporam conhecimento de especialistas sobre um domínio restrito. Este conhecimento é armazenado em uma base de conhecimento e é manipulado pelo mecanismo de inferência do sistema especialista para resolver problemas neste domínio.

Um Sistema Especialista é basicamente formado por três componentes:

- **"Base de dados"**: base de conhecimento - descreve a situação corrente e a meta;
- **"Conjunto de operadores"**: mecanismos para exploração - unidades que operam sobre a base de dados;
- **"Estratégia de controle"**: *raciocínio para frente* (bottom-up) - aplicação de operadores sobre as estruturas na base de dados que descreve a situação do domínio de uma tarefa para produzir uma situação modificada, e *raciocínio para trás* (top-down) - aplicação de operadores sobre as metas para reduzi-las às submetas. A combinação dos dois raciocínios também é possível.

Para que um sistema especialista seja eficaz, as pessoas têm de ser capazes de interagir com ele facilmente. Para facilitar esta interação os sistemas devem ser capazes de:

- "Explicar seu raciocínio". Conseqüentemente o processo de raciocínio deve proceder em etapas compreensíveis em que o metaconhecimento suficiente (conhecimento sobre o processo de raciocínio) esteja disponível para que as explicações dessas etapas possam ser geradas;
- "Adquirir conhecimento novo e modificar o conhecimento antigo". Como o conhecimento pode ser aumentado e/ou alterado, torna-se importante então separar a base de conhecimento do conjunto de operadores do sistema.

## Principais Benefícios da Utilização dos Sistemas Especialistas

- Velocidade na determinação dos problemas;
- A decisão está fundamentada em uma base de conhecimento;
- Segurança;
- Exige pequeno número de pessoas para interagir com o sistema;
- Estabilidade;
- Dependência decrescente de pessoal específico;
- Flexibilidade;
- Integração de ferramentas;
- Evita interpretação humana de regras operacionais

## Lógica Fuzzy e Sistemas Especialistas.

Lógica Fuzzy é um modo de comunicação entre processos analógicos contínuos e um microprocessador digital que é capaz de interpretar estas situações com valores numéricos bem definidos, os chamados valores discretos.

Por exemplo, considerando um sistema de frenagem, dirigido por um microcontrolador; o microcontrolador toma as decisões baseado na temperatura do freio, velocidade, e outras variáveis do sistema.

A variável "temperatura" neste sistema pode ser dividida dentro de uma faixa de "estados": "frio", "fresco", "moderado", "morno", "quente", "muito quente". Contudo, a transição de um estado para o próximo é difícil de fixar, para isto, um limite deve ser fixado para dividir o "morno" do "quente", mas isso resultaria uma mudança descontínua quando o valor de entrada ultrapassasse este limite, é justamente para evitar este salto que foi criada a lógica Fuzzy.

A lógica Fuzzy estabelece funções de entrada de dados, o que permite que ao mesmo tempo em que uma variável seja reduzida, outra é simultaneamente acrescida, fazendo com que em algum ponto o valor limite (valor verdadeiro) seja alcançado pelas duas funções, como por exemplo, 0,6 normal e 0,4 morno, acarretando em uma mudança de estado sem o salto que antes era inevitável.

As variáveis de entrada em um sistema de controle Fuzzy são em geral mapeadas dentro de conjuntos de funções consecutivas.

Primeiro é o processo de conversão de um valor de entrada intermediário em um valor Fuzzy que é chamado de "fuzificação".

Determinando o mapeamento das variáveis de entrada dentro das funções e dos valores verdadeiros, o microcontrolador então toma decisões para que as ações sejam efetuadas segundo as seguintes regras:

```
IF temperatura do freio IS morna AND velocidade IS não muito rápida  
THEN pressão do freio IS ligeiramente reduzida
```

Neste caso, as duas variáveis de entrada são "temperatura do freio" e "velocidade". A variável de saída, "pressão do freio", é semelhantemente gerada a partir de um conjunto Fuzzy que toma suas decisões baseadas nas variáveis de entrada e nas regras estabelecidas, podendo gerar diferentes valores para a pressão, como por exemplo, "ligeiramente reduzida", "ligeiramente acrescida", e assim por diante. A esta interpretação nós chamamos de desfuzificação.

A lógica Fuzzy é muito utilizada não só por causa de sua grande aplicação prática, mas principalmente por ser baseada em dispositivos simples e de baixo custo, além de ser muito facilmente atualizado por via de implementação de novas regras para executarem mais tarefas mais eficazmente.

A Figura 1 mostra, de forma simples, o processo de construção de uma estratégia de controle assistida por modelo.



Figura 1. Processo de construção de estratégia de controle assistida por modelo.

## 2 APLICAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA EM CARAJÁS

O objetivo inicial do sistema configurado para a planta de moagem e produção de pellet-feed em Carajás, é a solução de um conjunto de problemas levantados na operação do circuito de polpa adensada para alimentação dos filtros prensa "LAROX". Grupos de regras foram construídos utilizando lógica discreta e lógica "Fuzzy" com os seguintes objetivos:

- Minimizar recirculação de polpa do underflow do espessador por nível alto do tanque de armazenagem de polpa.  
Se o nível do tanque estiver alto, a rotação da bomba do underflow sofre incrementos negativos na rotação da bomba, a fim de se evitar novamente nível alto do tanque.  
Quando o espessador entra em processo de recirculação automaticamente corta a alimentação dos moinhos gerando grandes perdas de material e reduzindo a recuperação em massa da planta.
- Evitar que o valor medido na densidade do underflow do espessador ultrapasse o valor crítico ( $2,55 \text{ t/m}^3$  ou 76% de sólidos).  
Se a densidade de polpa atingir o valor crítico, a bomba sofre incrementos muito positivos de velocidade, a fim de se reduzir esse valor.
- Impedir o desbalanço de massa do espessador na planta.  
O sistema elabora um cálculo da massa que entra no espessador e da massa que sai, e atua na rotação da bomba.  
O sistema também calcula a recuperação em massa da planta e com base deste calculo corrige o balanço de massas e trabalha com novo valor o mais próximo do real
- Otimizar a densidade do underflow do espessador.  
O sistema especialista busca a densidade ideal (setada pelo operador) que melhor atenda ao processo de filtragem. Sabe-se que uma densidade maior na alimentação dos filtros prensa proporciona redução do tempo do ciclo de filtragem. Esta redução de tempo resulta no aumento de produtividade do filtro.

- e) Eliminar a condição de perda de lamas pelo overflow do espessador. Quando o operador verifica visualmente que o espessador está vertendo lama, uma estratégia é acionada no sistema especialista, a fim de eliminar essa condição.
- f) Foi criado um alarme no sistema chamado de deficiência de bombeamento. O sistema pega 03 informações velocidade da bomba, vazão de bombeamento e chave de posição de abertura de válvula guilhotina. A estratégia básica é a seguinte:  
se bomba esta com rotação acima de 95% e alimentando o tanque de polpa e vazão zerada temos então um problema no bombeamento .
- g) Foi criada uma estratégia de proteção no espessador chamada de densidade crítica; esta proteção visa respeitar a máxima concentração bombeável no underflow de polpa. Caso a densidade de polpa alcance este valor crítico a bomba abandona as regras primárias e recebe incrementos muito positivo de velocidade resguardando a integridade da máquina.

A Figura 2 mostra o espessador onde está aplicado o sistema especialista.



Figura 2. Espessador onde está aplicado o sistema especialista.

### **Estratégias de controle com o sistema especialista**

$$\begin{aligned} & \text{Balanço de Massas no Espessador} \\ & = \\ & (\text{Vazões de Saída} - \text{Vazão de Entrada} - \text{Erro Inicial}) \end{aligned}$$

#### **Réguas de Otimização:**

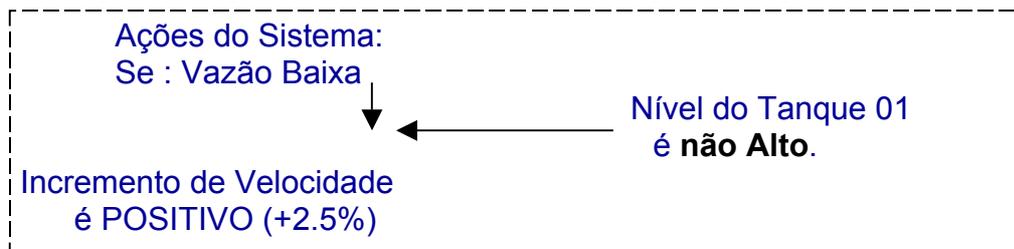
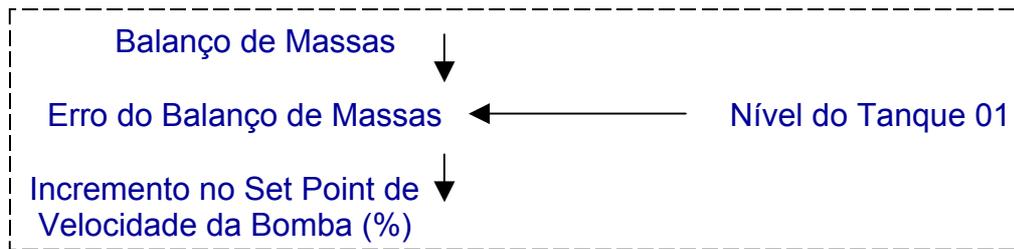
Réguas Baseadas em Lógica Fuzzy

#### **Réguas de Proteção:**

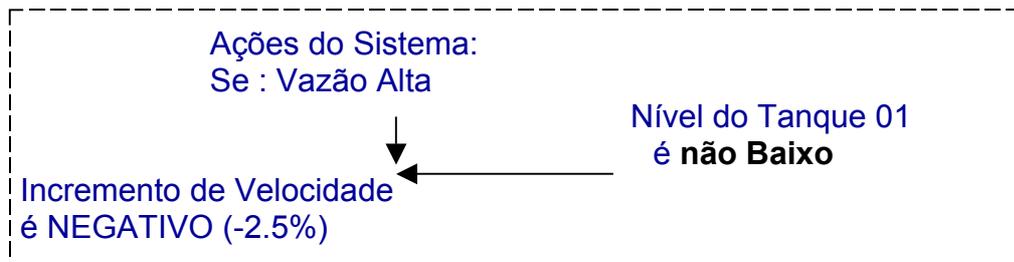
Réguas Baseadas em Lógica Booleana

#### **Réguas de Otimização:**

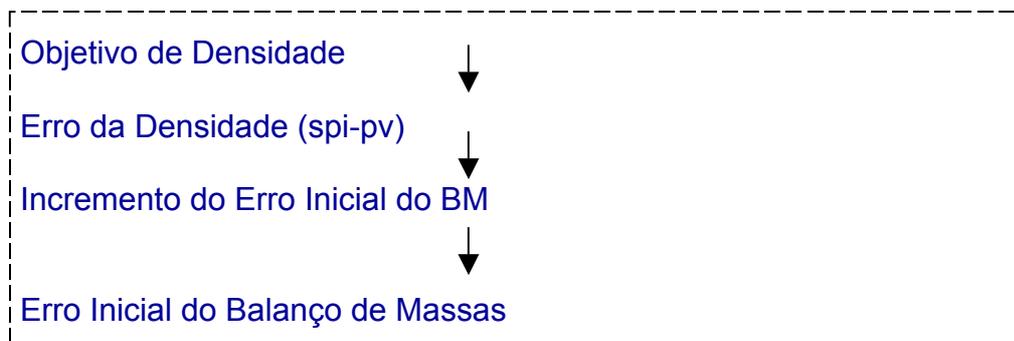
Equilíbrio do Balanço de Massas



**Analogamente Temos:**



**Otimização da Densidade do Under do Espessador**



**Regras de Proteção:**

- Obedecer as Restrições do Circuito**
- Espessador Vertendo Lama
  - Tanque 01 com Nível do Alto
  - Densidade Acima do Nível Crítico

Se Espessador Vertendo Lama ↓  
 Ajuste do Objetivo de Densidade (spi = 2.15) ↓  
 Incremento do Erro Inicial do BM (Muito Positivo) ↓  
 Erro Inicial do Balanço de Massas ↓

Se Espessador Vertendo Lama ↓  
 Densidade < Densidade de Parada de Condição de Lama (2.15) ↓  
 Espessador não Vertendo Lama ↓

**Tanque 01 com Nível Alto**  
 Se Nível do Tanque 01 > Tanque 01 Nível Alto (70%) ↓  
 Inibe Completamente as Regras que Controlam a Velocidade da Bomba ↓  
 Incremento na Velocidade Muito Negativo (-5%) ↓

**Densidade Acima do Nível Crítico**  
 Se Densidade do Under > Densidade Nível Crítico (2.42) ↓  
 Inibe Todas as Regras que Atuam na Velocidade da Bomba, inclusive a anterior. ↓  
 Incremento na Velocidade Muito Positivo (+5%) ↓

Nas Figuras 3 e 4 são mostrados o Console de Ativar OCS no Supervisório e as Telas gráficas de controle do OCS respectivamente.



Figura 3. Console do sistema.

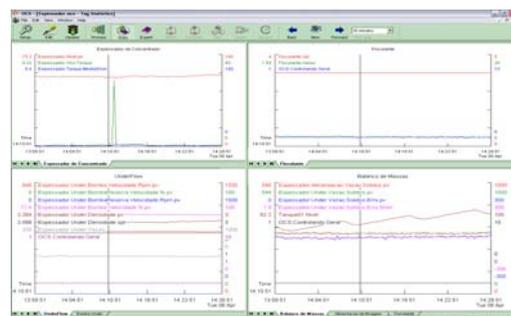
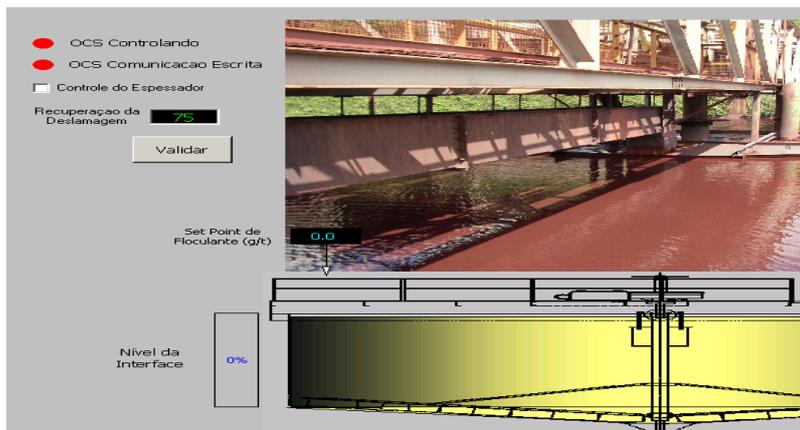
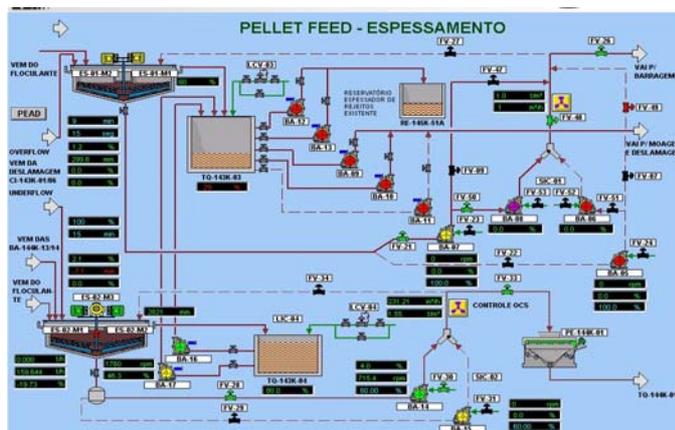


Figura 4. Telas Gráficas de Controle.

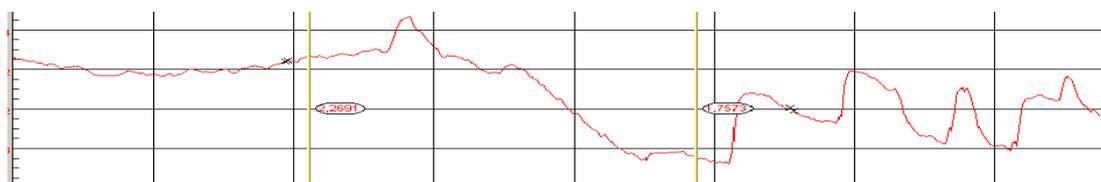
## Tela principal do Sistema no software



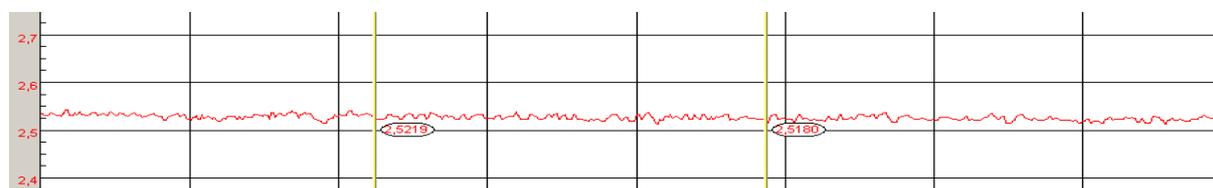
## Tela principal no supervisório



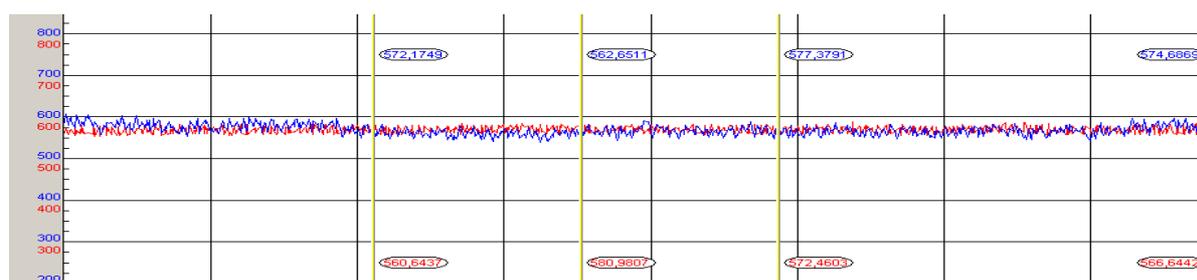
### Densidade do espessador sem o controle do sistema especialista



### Densidade do espessador com o controle do sistema especialista



### Equilíbrio do Balanço de Massas Ton. / h



Na Tabela 1 é mostrada uma Análise Geral dos Dados :

Tabela 1. Análise Geral dos Dados.

| PARÂMETRO ANALISADO                  | DADOS DOS TESTES |        |
|--------------------------------------|------------------|--------|
|                                      | OCS              | MANUAL |
| Densidade de Polpa                   | 2,45             | 2,31   |
| % de tempo do moinho sem alimentação | 2 %              | 7 %    |
| Massa retirada do Espessador         | 595              | 553    |

### 3 CONCLUSÃO

O equilíbrio do balanço de massas no espessador se mostrou possível de ser alcançado ao longo do tempo. Este equilíbrio será de grande valor para o processo, principalmente quando esta estabilidade conseguir vir somada da estabilização da densidade do under flow do espessador em patamares mais elevados.

O controle do espessador, com o Sistema Especialista inspirou bastante otimismo quando da análise de sua capacidade de otimizar a densidade do under flow sem desrespeitar as restrições do processo.

Mesmo com o pouco tempo de operação do sistema, como consequência natural da conclusão anterior, notou-se um grande potencial de redução no número de paradas da moagem em função de nível alto do tanque 01.

As restrições do processo apresentadas neste trabalho poderão e deverão ser atenuadas quando se buscar de forma mais eficaz o equilíbrio global dos circuitos subjacentes ao espessador, como moagem e filtragem. Isto seguramente trará ganhos ainda mais substanciais.

Inicialmente foi estipulado que o sistema deveria resultar em um ganho:

- \_ Aumento na densidade **4 %**.
- \_ Diminuição do corte de alimentação da moagem **10 %**.
- \_ Aumento na retirada de massa do espessador **3 %**.

Os resultados do controle com o sistema otimizador OCS foram de (dados do arquivo de log do OCS):

- \_ Aumento na densidade + **6 %**.
- \_ Diminuição do corte de alimentação da moagem **28%**.
- \_ Aumento na retirada de massa do espessador **7%**.
- \_ Redução da umidade de torta nos filtros prensa para o valor de projeto (7,5%) devido ao aumento da densidade de polpa.
- \_ Obtivemos, também, redução nos tempo de bombeamento na filtragem devido ao aumento da densidade de polpa; os tempos anteriores de bombeamento eram de 5 minutos e foram reduzidos para 3 minutos, representando um aumento da produtividade de 20%

É importante ressaltar que a configuração atual poderá ser modificada no futuro contemplando novas opções que surgirão. Desta forma espera-se ganhos ainda mais expressivos na redução de consumos específicos e produção.

### BIBLIOGRAFIA

- 1 HARMON, P.; KING, D. **Sistemas especialistas. A inteligência artificial chega ao mercado**. Rio de Janeiro: Campus, 1988.
- 2 OLIVEIRA, S. **Sistemas inteligentes**. São Paulo: Manole, 2002.
- 3 TAVARES, H.M.F.; CAMINHAS, W.M.; Gomide, F.A.C. Sistema de classificação de padrões usando redes neuro-fuzzy e redes neurais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAI, 2., 1995, Curitiba. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Redes Neurais, 198?. p. 185-190.

# USE OF SYSTEM OF CONTROL OTIMIZANTE (SYSTEM SPECIALIST) IN THE SEARCH OF THE CONTROL OF THICKENERS PULP DENSITY<sup>1</sup>

*Henrique Gustavo da Silva<sup>2</sup>  
Antonio Lucas de Medeiros Silva<sup>2</sup>  
Keulla Venya Urbano e Silva<sup>2</sup>  
Jose Marcelo de Carvalho Nunes<sup>2</sup>*

## **Abstract**

In the last decade the number of industrial applications that make use of elements of artificial intelligence (WENT), grew exponentially. The technological advances in the computational processing and a bigger knowledge, on the part of the industrial sector, the technology of WENT had propitiated the sprouting of applications that had substituted partially or integrally the operation human being in a series of industrial processes. The benefits of the use of this technology are evidences: Bigger trustworthiness in the operation, minor reply time, optimization and operational absence of stress. Considering this, the industry of mineral improvement comes making use of the deriving benefits of the job of this technology. In particular, it is important to stand out that the same one constitutes a fertile field of applications for WENT. Systems of otimizantes control determine continuously and implement "set optimized points", that they reflect a control strategy selected, keeping the required quality of the product and making with that objective technician-economic they are reached. These results in a capacity increase, better quality control of the product and/or in a decrease in the production costs. After one soon comparison enters the conventional techniques of control and the use of otimizantes systems of control, is made a critical analysis on control based on models, use of neural nets and control specialist with misty logic or "fuzzy". In this work a control system is presented, that uses elements of Artificial Intelligence, Logical FUZZY and Systems Specialists for the Control of Pulp Density of Espessadores de Pellet-Feed in Carajás In the case below, the knowledge of the determined experienced operators on domains of the process of mineral improvement, was transferred to the control system. With this, the same he was prepared to answer to imposed the operational circumstances it. In the same way that an experienced operator would make it, however of faster form, less capable of the errors and imperfections. Currently the control system is working and being applied in the following points: control and increase of the density of the espessador of concentrate; control of rocking of masses of the espessador of concentrate; to minimize cut of feeding of the milling of balls of Carajás; protection of the espessador of concentrate.

**Key-words:** Specialist system; Carajás; Strategy; Density.

<sup>1</sup> *Technical Contribution to the VIII Processes Automation Seminar by ABM (Brazilian Society for Metallurgy and Materials), Belo Horizonte, MG, Brazil, 2004, October 6-8.*

<sup>2</sup> *Technician of Control of Process*