

# SISTEMA DE CONTROLE OTIMIZANTE BASEADO EM MODELOS MATEMÁTICOS DINÂMICOS EM IMPLANTAÇÃO NOS FORNOS DE PELOTIZAÇÃO DA COMPANHIA VALE DO RIO DOCE – DIPE<sup>1</sup>

*Marco Aurélio Soares Martins*<sup>2</sup>  
*Cácio José da Silva*<sup>3</sup>  
*Magno Rodrigues Ribeiro*<sup>4</sup>  
*Alexandre Cabral Stelzer*<sup>5</sup>  
*Marcelo Ciminelli Mendes*<sup>6</sup>  
*Christophe Bouché*<sup>7</sup>

## Resumo

A automação de processos na indústria mineral tem evoluído rapidamente, permitindo que as estratégias de controle de processos incorporem esta evolução. Isto é importante devido às dificuldades de se controlar malhas altamente interdependentes, com grandes tempos de atrasos e de difícil percepção, já que diversos parâmetros de processo não podem ser medidos “on line”. São abordados aspectos e deficiências das tecnologias convencionais de controle e são apresentadas as técnicas avançadas de controle de processo otimizante que utilizam tecnologias de inteligência artificial como: sistema especialista, modelo físico de processo, rede neural e lógica nebulosa. São enfatizadas as vantagens do emprego do sistema de controle otimizante baseado em modelos matemáticos na indústria mineral, que permite trazer ganhos significativos em performance, em comparação com a utilização de técnicas convencionais.

**Palavras-chave:** Controle otimizante; Modelo matemático; OCS.

1- Contribuição Técnica ao **60º Congresso Anual da ABM**, a ser realizado nos dias 25 a 28 de julho de 2005, em Belo Horizonte – Minas Gerais

<sup>2</sup> Eng. M. Sc. e Diretor de Operações da CEMI – Consultoria em Engenharia Mineral

<sup>3</sup> Eng. de Processos – CEMI – Consultoria em Engenharia Mineral

<sup>4</sup> Companhia Vale do Rio Doce – CVRD – DIPE

<sup>5</sup> Companhia Vale do Rio Doce – CVRD – DIPE

<sup>6</sup> Companhia Vale do Rio Doce – CVRD – DIPE

<sup>7</sup> Eng. de Processos – Metso Mineral Cisa

## **INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, a indústria tem estado sob pressão para operar as plantas continuamente a níveis sem precedentes de picos de performance econômica, em um mundo altamente competitivo. As qualidades do produto, altas taxas de alimentação e custos minimizados precisam ser atingidos a cada minuto.

Técnicas avançadas de controle de processo estão entre os métodos mais efetivos em custo e prazo para melhorar a performance metalúrgica da planta. A Taxa de Retorno do Investimento varia tipicamente de 100 a 5000 %.

A utilização de modelos físicos fenomenológicos nos sistemas de controle possibilita a obtenção de valiosas informações sobre o processo em tempo real, permitindo identificar e prever as causas de distúrbios nas variáveis de controle, fazendo com que o sistema otimize a operação a cada instante.

## **DEFICIÊNCIAS DO CONTROLE CONVENCIONAL**

Controles de processo convencionais são baseados no estabelecimento de malhas de controle em partes específicas da indústria, onde uma saída do processo é mantida próxima ao Valor de Referência pela manipulação de uma variável específica. Malhas de controle independentes são estabelecidas e calibradas para todas as saídas do processo.

Este enfoque não tem tido muito sucesso em circuitos de produção de clínquer, pelotas, moagem de cimento e beneficiamento mineral em geral. As razões são várias:

Primeiro, para operações como clinquerização, pelotização e moagem em moinho de bolas, o atraso entre as mudanças das entradas e a medida de seus efeitos nas saídas do processo tende a ser muito longo. Isto requer uma falta de sintonia entre as malhas de controle PID, acarretando um atraso em todo o sistema de controle.

Em segundo lugar, há uma forte interação entre as malhas de controle, nas quais uma simples entrada afetará todas as saídas do processo. Portanto, as malhas de controle atualmente “lutam” umas contra as outras.

Em terceiro lugar, o objetivo do controle PID é manter as variáveis de saídas próximas a um Valor de Referência pré-determinado, negligenciando a performance do processo como um todo. Esse tipo de controle não trás vantagens quando se processa matérias primas de características mais favoráveis, sendo perdida a oportunidade de ganhos adicionais de produtividade.

Por último, cada malha de controle não leva em consideração o que o resto da usina está fazendo. Esta falta de controle integrado pode implicar em um desempenho mais pobre para a usina como um todo.

## **EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE**

Com a constante mudança nas necessidades empresariais para sobrevivência e competitividade no mercado, os sistemas de controle evoluíram seguindo os objetivos e utilizando as tecnologias desenvolvidas ao longo do tempo como mostra a Figura 1 abaixo.

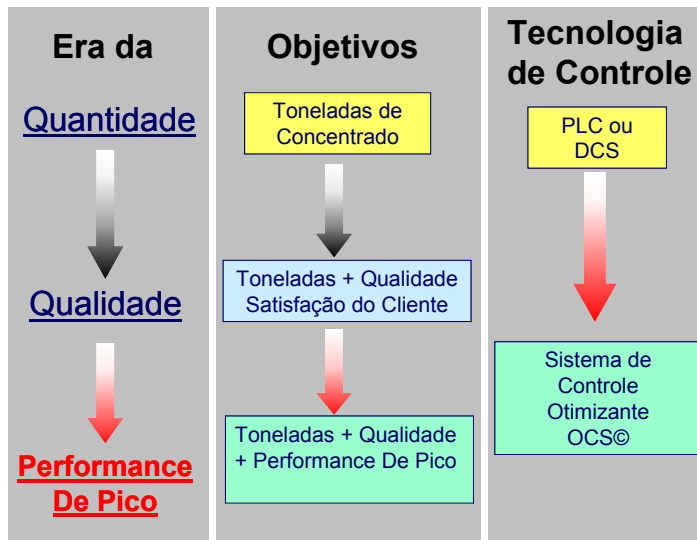


Figura 1. Evolução dos sistemas de controle.

## SISTEMAS DE CONTROLE OTIMIZANTES

Estes sistemas são incorporados à estrutura de controle de uma usina industrial comunicando diretamente com os CLP's ou sistemas distribuídos, atuando em tempo real nas variáveis manipuladas, segundo estratégias desenvolvidas pelos operadores e engenheiros da planta. A vantagem é que estão monitorando todas as variáveis do circuito a cada instante, predizendo as perturbações que podem ser causadas às variáveis controladas (itens de controle ou objetivos) e atuando antes que ocorram os desvios. Como consequência, obtêm-se menores dispersões nos resultados finais e custos e produtividades otimizados a cada instante.

A necessidade e justificativas para a utilização de sistemas de controle otimizante na indústria mineral pode ser resumida nos seguintes tópicos:

Os processamentos minerais são sistemas complexos não lineares, influenciados por inúmeros fatores. A otimização contínua da qualidade, tonelagem e custos geralmente resulta em significativos ganhos de lucratividade.

Estratégias de controle complexas não podem ser implementadas convenientemente utilizando tecnologia convencional de controle. Os sistemas de controle otimizante podem ser desenvolvidos tão flexíveis quanto necessário.

Grande parte do conhecimento do processo não pode ser apreendida através do controle convencional. A tecnologia de controle otimizante oferece numerosas alternativas para isto, principalmente com a utilização de modelos físicos do processo.

A Figura 2 abaixo mostra a hierarquia típica e o fluxo de informações de processo em uma usina com sistema de controle otimizante.

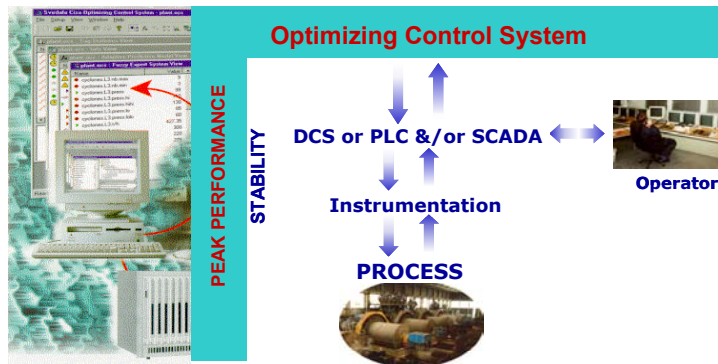


Figura 2. Arquitetura de um sistema de controle Otimizante

## SISTEMAS DE CONTROLE OTIMIZANTE BASEADOS EM MODELOS

Muitas das limitações das estratégias clássicas de controle são devidas à falta de informações sobre as magnitudes de respostas das variáveis controladas, causadas por mudanças nas variáveis manipuladas, e sobre a natureza das interações entre estas variáveis (Herbst and Rajamani, 1982). O problema se agrava pelo fato de que importantes distúrbios, como mudanças na composição mineralógica e dureza, exemplo relevante na moagem, não podem ser medidas diretamente em tempo real. Métodos de controle de realimentação consideram que a direção da mudança em uma variável manipulada para ação corretiva em uma variável controlada é conhecida e que o ganho do controlador pode ser adequado para todas as situações. Mas, freqüentemente, as respostas dos sistemas de processamento para produção na área mineral e cimenteira são muito mais complicadas para serem caracterizadas tão simplesmente. Uma solução adequada para este problema é o desenvolvimento e a inclusão no sistema de controle de informações que faltam sobre o processo, através do desenvolvimento de um modelo. Através deste modelo, respostas bem fundamentadas aos distúrbios podem ser previstas e, conseqüentemente, uma performance otimizada pode ser atingida.

A essência de um sistema de controle baseado em modelo pode ser assim resumida:

- Um modelo de processo simples o suficiente para ser usado em cálculos contínuos (on-line), mas detalhado o suficiente para reproduzir as características essenciais do processo;
- Um estimador que combina medições dentro do processo e informações do modelo para determinar o estado do sistema a qualquer tempo e;
- Um otimizador que usa o estado atual do sistema e o modelo para selecionar o melhor caminho para as variáveis manipuladas de forma a atingir os objetivos do processo de uma forma ótima.

Desta forma, o otimizador supervisiona os Valores de Referências das malhas de controle, fornecendo o melhor caminho para o controlador, e até pode alterar estes Valores de Referências dinamicamente obedecendo às prioridades e restrições do processo.

## SISTEMA DE CONTROLE OTIMIZANTE EM IMPLANTAÇÃO NOS FORNOS DE PELOTIZAÇÃO DA CVRD

O complexo de pelotização da CVRD envolve 07 plantas, com o mesmo fluxograma básico, como apresentado na Figura 3.

Os equipamentos principais consistem em stackers e reclaimers, moinhos de bolas e hidrociclones, espessadores e tanques de homogeneização, filtros de disco a vácuo, misturadores, discos de pelotamento, forno de grelha reta, peneiras de pelota queimada e precipitadores eletrostáticos.

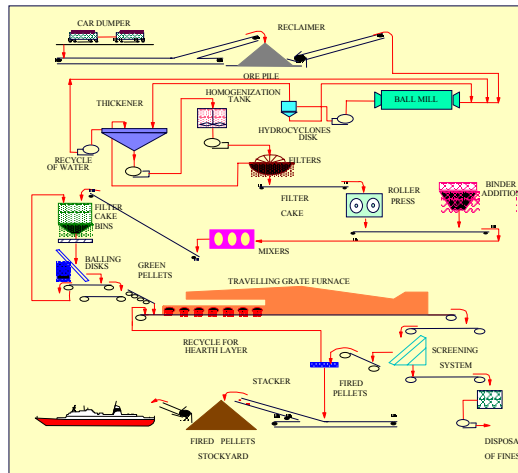


Figura 3. Fluxograma de processo

O objetivo do controle otimizador nos fornos é produzir pellets sob características específicas em termos de composição química, distribuição de tamanho, dureza, compressão a frio, redutibilidade, desintegração, buscando-se manter os objetivos de qualidade com mínimo desvio padrão e também minimizando o consumo de combustível e energia elétrica. Na moagem, objetiva-se alcançar máxima produtividade, sendo mantido o seu produto com características de superfície específicas determinadas, minimizando o desvio padrão e o consumo de energia e corpos moedores.

O sistema para o controle otimizador dos fornos da CVRD foi concebido com a utilização de dois sub-sistemas independentes, mas que comunicam entre si continuamente. O primeiro deles é o módulo de controle, no qual se concentra toda a estratégia avançada de controle, obtida a partir do conhecimento dos operadores e engenheiros, refletindo a melhor estratégia de controle e, ainda, utilizando ferramentas avançadas estatísticas e técnicas de lógica nebulosa. Neste módulo, mesmo na ausência de previsões do modelo dinâmico do processo, é garantida uma operação em alto nível.

O segundo módulo processa o modelo dinâmico do processo. Os modelos utilizados são equações do processo de queima e endurecimento das pellets, associadas a um modelo do balanço de gases para todo o processo. O modelo dinâmico propicia os seguintes benefícios e facilidades:

Quantificação "On-line" de variáveis não mensuráveis que influenciam a qualidade das pellets através do processo (Soft Sensor).

Deteção antecipada de mudanças nas variáveis que influenciam a qualidade de pellets.

Predição “*On-line*” de algumas propriedades das pelotas e suas variações em todos os pontos do forno.

As predições do modelo são usadas nas regras para implementar ações apropriadas com objetivo de manter a qualidade das pelotas quando acontece algum distúrbio no processo.

Na aplicação do OCS<sup>®</sup> para o forno, os modelos físicos ou “soft sensor” são poderosos e sofisticados algoritmos. Nestes algoritmos estão embutidos profundos conhecimentos do processo: conservação de massas, transferência de calor, secagem, combustão, etc. O acerto do algoritmo é garantido pelo uso da técnica do filtro de Kalman, utilizada para automaticamente adaptar alguns parâmetros do modelo com base em medidas reais das variáveis observadas.

As variáveis estimadas tipicamente incluem variáveis que não podem ser medidas (tais como a temperatura das pelotas, umidade ou grau de oxidação em qualquer ponto da camada de pelotas) e variáveis que podem ser medidas, mas que por algum motivo não são medidas.

Como citado anteriormente, para o caso dos fornos da CVRD dois modelos são usados cooperativamente:

- Modelo do fluxo de gás
- Modelo de Queima

O modelo do fluxo de gás é um modelo independente, enquanto o modelo de queima depende de resultados do modelo de fluxo de gás para executar a predição.

O modelo de fluxo de gás é essencialmente um modelo de balanço de massas on-line que aplica equações de conservação de massas. Ele reconcilia dinamicamente informações independentes dos fluxos de gás.

As informações independentes dos fluxos de gás são inferidas pelos medidores perto de cada ventilador (queda de pressão, temperatura do gás, e potência) e com a ajuda das curvas dos ventiladores estabelecidas ou coletadas pela CVRD.

Os fluxos de gás estão entre os parâmetros chave para o modelo dinâmico de queima. A precisão da predição do modelo de queima, portanto, depende da precisão do modelo dinâmico de fluxo de gás.

O modelo de queima se baseia em equações fenomenológicas diferenciais que levam em conta a transferência de calor entre o gás e as pelotas e as principais reações químicas envolvidas no processo de queima. No processo, as pelotas viajam horizontalmente e continuamente através do forno. O transporte da fase de gás através do processo é mais complexo; o fluxo de gás principal por si só é muito complexo e, além dele, existem numerosos pontos de entradas de ar falso – ar sem controle entrando no processo – e vazamentos entre as zonas na camada de pelotas e através da camada.

O modelo de transporte de sólidos para cada camada consiste em uma série de “reatores unitários”, sendo cada reator modelado como um misturador perfeito. Cada área da planta (da secagem ascendente até o resfriamento secundário) é modelada como ilustrado na figura 5.

Os sólidos são transferidos horizontalmente de um reator unitário a outro enquanto o gás é transferido verticalmente.

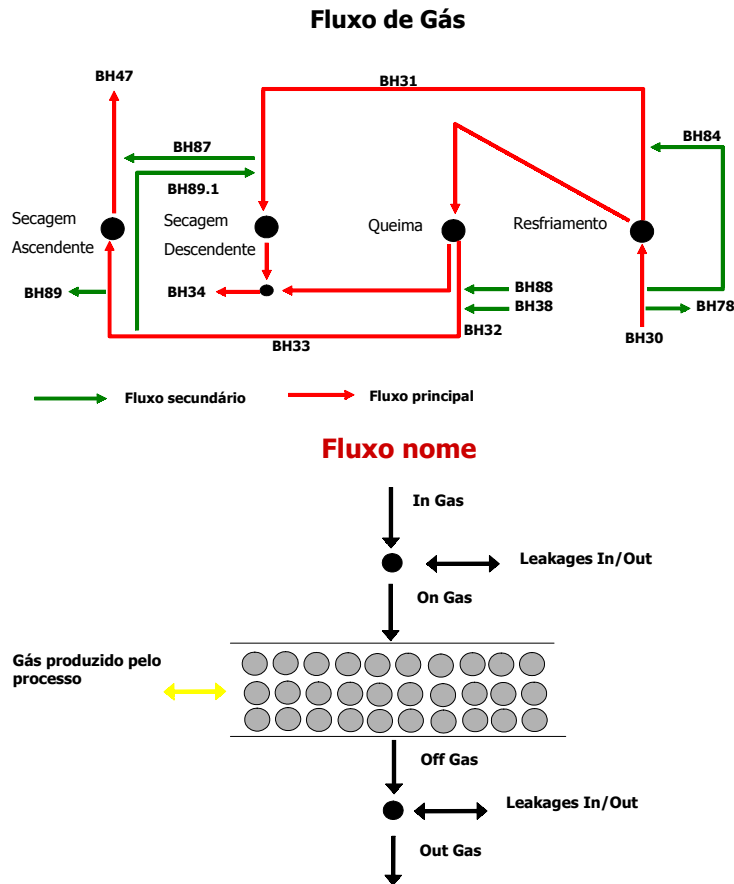


Figura 4. Desenho esquemático do modelo de fluxo de gases.

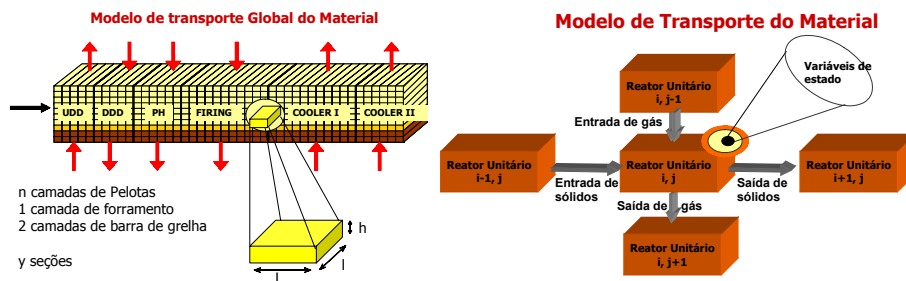


Figura 5. Ilustração do modelo de queima e endurecimento de pelotas.

Algumas das variáveis dos modelos são medidas (pelos sensores de campo) e outras estimadas pelo modelo matemático. Estas variáveis são chamadas observadas. O algoritmo do filtro de Kalman é usado para comparar variáveis medidas e estimadas com o objetivo de ajustar alguns parâmetros do modelo. A figura 6, a seguir, ilustra este método de auto-sintonização ou calibração dos modelos.

## Implementação do Modelo

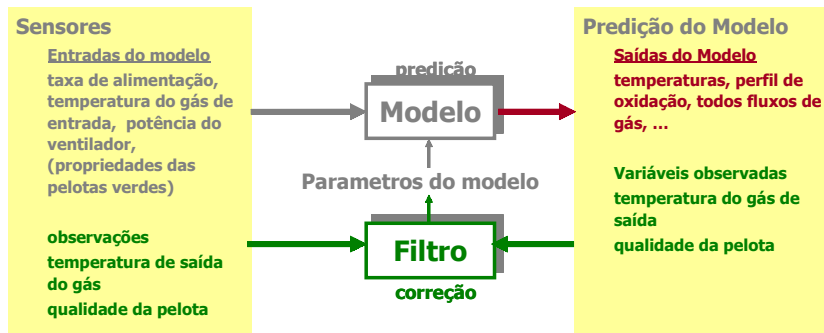


Figura 6. Esquema da auto-sintonização do modelo com a utilização do filtro de Kalman.

Finalmente, o objetivo do Controle Otimizante nos fornos na CVRD é o atendimento a duas situações distintas:

1. Gerenciamento de Condições anormais de operação:

Alta resistência à passagem de ar ascendente ou descendente na camada de pelotas; baixa secagem das pelotas no início do forno; baixo resfriamento da pelota no final do forno.

2. Quando a operação está em condições normais para cada tipo de pelota, o controle busca:

- Minimizar o consumo de energia com a produção atendendo ao objetivo.
- Qualidade da pelota acima de um mínimo requerido, ou seja, CCS (resistência à compressão) > CCS Mínimo e AI (Índice de Abrasão) < Máximo AI.

A figura a seguir ilustra os controles acima mencionados e suas posições no forno.

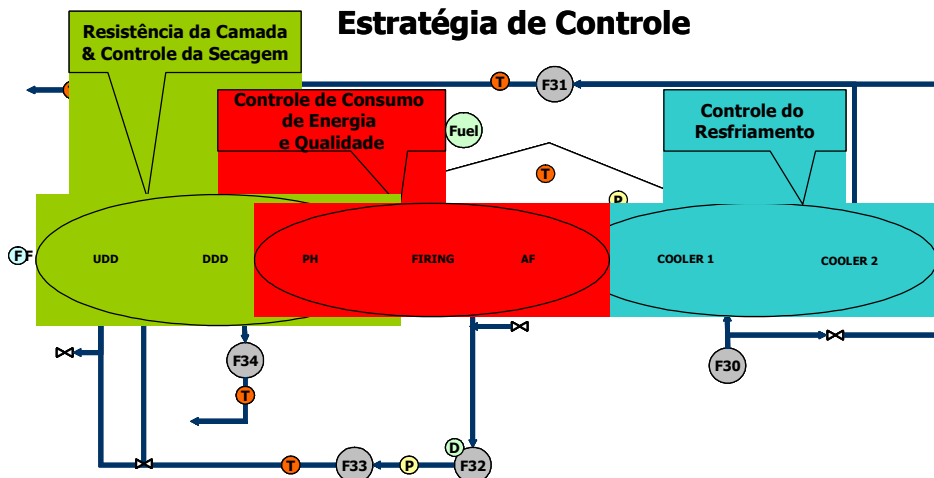


Figura 7. Desenho esquemático apresentando o controle do forno de pelotização.



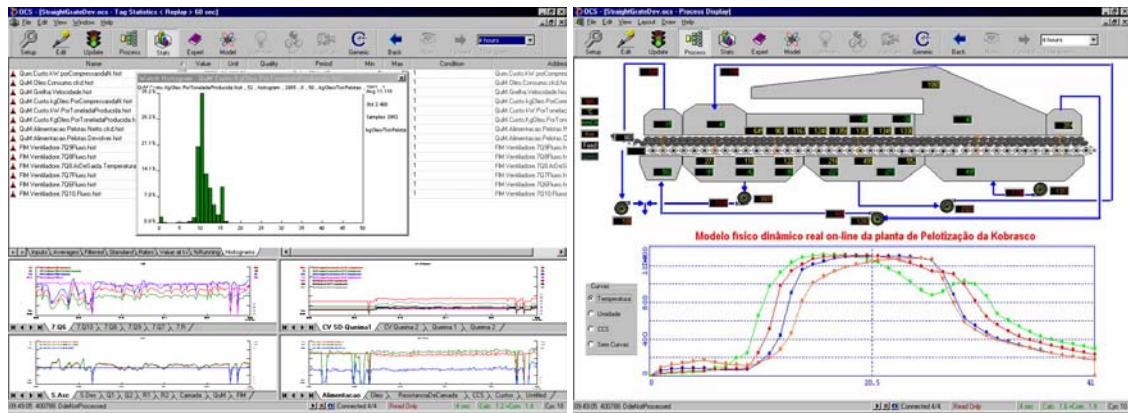


Figura 8. Telas do OCS© na CVRD.

Além das aplicações no Brasil, sistemas de controle otimizantes baseados em modelos têm sido amplamente implantados no exterior, como é o caso da planta de minério de ferro de Kiruna AG (LKAB – Suécia) e Sadiola Hill Gold Plant in Mali – África do Sul, dentre outras, tendo sido obtidos ganhos significativos de produtividade.

## CONCLUSÃO

Atualmente, existem técnicas já consagradas para predição de efeitos de distúrbios nas variáveis de controle de um processo que variam em função da complexidade e características do sistema produtivo. Estas técnicas incluem as redes neurais, sistemas multivariáveis e modelos fenomenológicos. Os sistemas especialistas com lógica nebulosa embutida completam os recursos disponíveis atualmente para controlar um processo industrial de maneira otimizada.

A implantação do sistema de controle otimizante baseado em modelos em fornos de pelotização representa uma forma garantida de maximizar a performance econômica da indústria, inter-relacionando os objetivos localizados e visando à lucratividade do empreendimento como um todo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Martins, M.A.S & Seixas, F. (1992) – “Avanços no Controle e Supervisão de Processos Minerários”. Encontro de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. Control of Mineral Processing Systems – Svedala-Brenda Process Technology-Orlando, Florida – Março 1998
- Herbst, J.A. & Oblad A.E., “Industrial Results Using Model-Based Expert System Control of Mineral Processing Plants”.
- Herbst, J.A. & Rajamani, K. (1982) – “The Application of Modern Control Theory to Mineral-Processing Operations”. Proceedings, 12th CMMI Congress. Johannesburg, S. Africa.
- Vien, A., Edwards R.P., Perry, R., e Flintoff B.C. (1996) – “Back to the Basics in Process Control”.

# MODEL BASED OPTIMIZING CONTROL SYSTEM IMPLEMENTED FOR THE CONTROL OF THE PELETIZING KILNS AT CIA. VALE DO RIO DOCE – VITÓRIA - ES

*Marco Aurélio Soares Martins  
Cácio José da Silva  
Magno Rodrigues Ribeiro  
Alexandre Cabral Stelzer  
Marcelo Ciminelli Mendes  
Christophe Bouché*

## **Abstract**

The process automation in the mineral industry is an area where the control strategies are incorporating quickly the technological evolution of advanced control techniques. This is very important due to difficulties in controlling highly interdependent loops, with big delay times which are hard to observe, at the same time that several process parameters can not be measured on line. Some aspects and deficiencies about conventional control technologies are discussed and the advanced optimizing process control techniques which apply artificial intelligence like: expert systems, physical process models, neural networks and fuzzy logic are shown. The advantages of using the Model-Based Optimizing Control for the mineral industry providing significant performance gains, when compared to conventional technologies are emphasized.

**Key-words:** Optimizing control; Mathematical model; OCS.