

CONTROLE OTIMIZANTE BASEADO EM MODELOS MATEMÁTICOS NOS CIRCUITOS DE MOAGEM DA CVRD DIPE – VITÓRIA (ES) E CVRD TIMBOPEBA – MARIANA (MG)

Martins, M.A.S.M.¹; Ribeiro, M.R.R.²; Lopes, E.S.L.³; Araújo, R.R.A.⁴; Marques, Á.J.M.⁶; Bouché,
C.B.⁷; Guyot, O.G.⁸; Silva, E.S.⁹

1 - CEMI Consultoria em Engenharia Mineral,
Av. Jose Cândido da Silveira 311, conj. 104, Cidade Nova, Belo Horizonte MG.

1 - marco@cemi.eng.br

2, 3, 4 e 5 - Companhia Vale do Rio Doce CVRD - DIPE,

Av. Dante Michelini, 5.500 - Ponta de Tubarão - Jardim Camburi.

2 - magno.ribeiro@cvrld.com.br

3 - evenilson@cvrld.com.br

4 - rodrigo.araujo@cvrld.com.br

5 - alisson.marques@cvrld.com.br

6 - cisacb@aol.com

7 - cisaog@aol.com

8 - elias.silva@cvrld.com.br

Nos últimos anos, tem havido uma evolução tecnológica muito grande no campo da automação de processos, sendo bastante influenciada por esta evolução a área de controle de processos na indústria mineral. Neste artigo são abordados aspectos e deficiências das tecnologias convencionais de controle e são apresentadas técnicas avançadas de controle de processos, que utilizam tecnologias de inteligência artificial tais como: sistema especialista, modelos físicos de processo, redes neurais e lógica nebulosa. São enfatizadas as vantagens do emprego do sistema de controle otimizador na indústria mineral, que trás ganhos significativos em performance, em comparação com a utilização de técnicas de controle convencionais.

Palavras-chave: Controle Otimizador, Moagem, Modelo Matemático e OCS.

Área Temática: Instrumentação e Controle de Processos.

INTRODUÇÃO

No mundo de hoje, a indústria segue um ritmo frenético de mudanças em busca da otimização dos processos produtivos. A automação de processos aparece neste contexto de maneira muito contundente para viabilizar a otimização dos processos minerais. As técnicas de controle vem sendo aprimoradas constantemente e, atualmente, pode-se dizer que a tecnologia de controle otimizante de processos é uma tecnologia madura, factível e capaz de trazer ganhos significativos para o processo em termos de qualidade dos produtos produzidos, redução de custos e aumentos de capacidade.

TÉCNICAS DE CONTROLE CONVENCIONAIS

Com relação à engenharia de controle convencional, um projeto pode ser dividido em duas classes de controle:

O controle das variáveis discretas, que efetuam os inter-travamentos de segurança dos equipamentos, o sequenciamento de partidas e paradas e a comunicação de defeitos.

O controle das variáveis analógicas tais como o controle de nível, temperatura, vazão, densidade, pressão, etc., que possui muito maior complexidade que o primeiro.

Para o controle discreto, os equipamentos de controle ideais são os Controladores Lógicos Programáveis (CLP), de uso já consagrado no mercado, enquanto que para o controle analógico existem várias opções: os próprios CLP's, Controladores de Malha Única (Single loops) ou Multimalhas, SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) e outros.

As duas técnicas clássicas de controle analógico, empregadas na maioria dos projetos convencionais, são o controle por realimentação (Feed Back Control) e o controle Antecipatório (Feed Forward Control), com predominância da primeira.

No controle por realimentação, a variável que desejamos controlar é medida através de um sensor e seu valor é comparado com o Valor de Referência (Set point). O erro serve de entrada para o controlador, cuja saída (variável manipulada) atua sobre o processo. Se a variável controlada tiver um valor acima da referência, o erro será negativo e o controlador agirá para diminuir o valor da variável controlada e vice-versa. Por isso, a realimentação é chamada de negativa, uma vez que a atuação sempre visa diminuir o erro.

A simples observação desse tipo de controle mostra que o controlador age sobre o fato já consumado. Só depois que a variável controlada foge do seu valor de referência é que o controlador atua para corrigir o erro.

No controle antecipatório, o controlador age com base no valor de referência e da perturbação medida. Quando ocorre uma perturbação, ele irá agir para evitar que a variável se afaste do valor de referência. Apesar deste tipo de controle ser mais eficiente, por agir antes que a perturbação já tenha afetado a variável controlada, é menos usado que o controle por realimentação, por ser de mais difícil implementação.

No controle por realimentação não precisamos conhecer quais são as perturbações que atuam sobre o processo e nem como estas perturbações afetam a variável controlada. Outra vantagem do controle por realimentação é que ele é universal, isto é, não depende nem do processo a ser controlado, nem do tipo de perturbação. Já o controlador do Controle Antecipatório deve ser projetado especificamente para um dado processo.

O algoritmo de controle mais utilizado em controle por realimentação é o algoritmo PID (Proporcional Integral Derivativo), que produz uma saída que é função do erro, da integral do erro e da taxa de variação do erro (da variável controlada na maior parte dos algoritmos práticos).

DEFICIÊNCIAS DO CONTROLE CONVENCIONAL

Controles de processos convencionais são baseados no estabelecimento de malhas de controle em partes específicas da indústria, onde uma saída do processo é mantida próxima ao valor do 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 clínquerização, pelotização e moagem em moinho de bolas, o atraso entre as mudanças das entradas e as medidas 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 de 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 obtenção 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.

SELEÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE APROPRIADO

Os seguintes critérios podem ser utilizados para seleção do sistema de controle mais apropriado:

Se o processo é fácil de ser controlado, bem conhecido, com boas medidas das variáveis manipuladas controladas, o controle por PID é adequado.

Se o processo é mais complexo e uma estratégia de controle pode ser definida, pode ser utilizado um controle baseado em regras ou um sistema especialista dotado de lógica nebulosa.

Se existe um modelo fenomenológico disponível ou que possa ser desenvolvido, é recomendável utilizar um sistema especialista baseado em modelo.

Se não existe um modelo disponível e o processo possui controle difícil, é recomendável utilizar uma rede neural ou controle multi-variável.

Se nenhuma destas situações é adequada, talvez, conceber novamente o processo.

SISTEMA DE CONTROLE OTIMIZANTE – PREENCHENDO A LACUNA

A ferramenta de controle otimizante deve utilizar conceitos de automação, inteligência artificial e algoritmos avançados de modelamento de processo com o objetivo de suprir as deficiências do controle convencional. Mesmo os sistemas especialistas, sendo ferramentas típicas da área de automação, são o nível de controle mais acessível à equipe de processo. Esta particularidade dos sistemas especialistas é quase uma imposição para que os projetos de implantação sejam bem sucedidos.

Possuem a vantagem de estarem 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.

Os processos minerais são sistemas complexos não lineares, influenciados por inúmeros fatores. A otimização contínua da qualidade, tonelagem e a obtenção de menores custos geralmente resultam 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 de forma tão flexível 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.

APLICAÇÃO DO CONTROLE OTIMIZANTE EM CIRCUITOS DE MOAGEM DE MINÉRIO DE FERRO NA COMPANHIA VALE DO RIO DOCE

O complexo de pelotização da CVRD DIPE possui 07 plantas, todas elas com o mesmo fluxograma básico, como apresentado na figura 1.

Os equipamentos principais são: 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 para pelotas queimadas e precipitadores eletrostáticos.

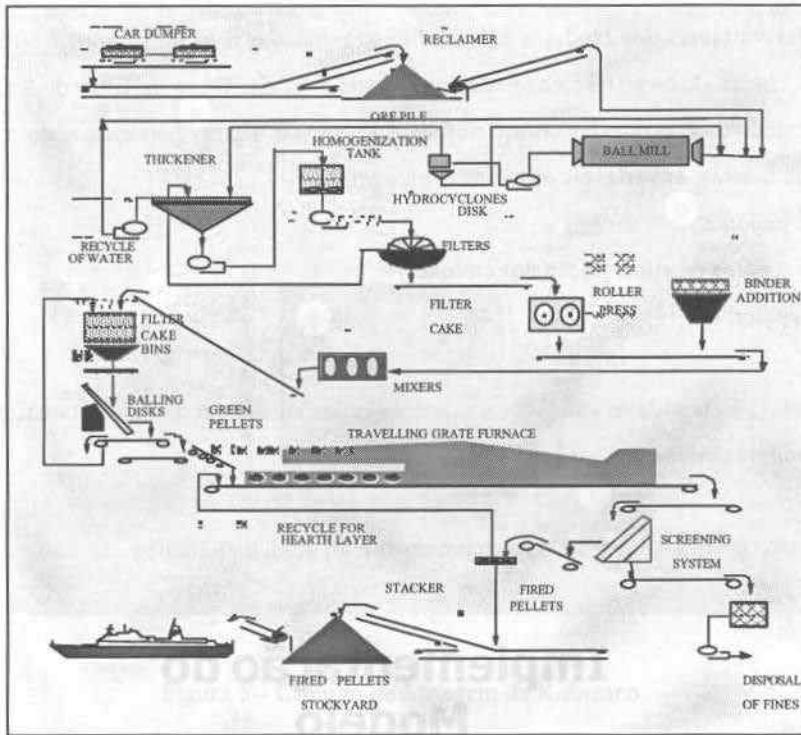


Figura 1 – Fluxograma de processo

Para o controle dos circuitos de moagem, o nível mínimo de instrumentação recomendado inclui medidas e controle da taxa de alimentação de minério e de todas as adições de água. Inclui ainda medidas de nível do tanque que recebe a descarga do moinho, controle de velocidade para a bomba, medidores de fluxo e de densidade na alimentação da ciclonagem, medidas de potência na moagem e pressão na alimentação da ciclonagem.

Na moagem da Kobrasco (CVRD DIPE) as variáveis contempladas foram:

- Controle da densidade de descarga do moinho
- Controle da densidade de alimentação dos hidrociclones
- Controle da superfície específica
- Controle de adição de cypbebs no moinho

A densidade de descarga do moinho é calculada por um modelo matemático de balanço populacional embutido no sistema especialista. Os modelos de balanço populacional fornecem estimativas de valores não mensuráveis no processo, tais como moabilidade ou grau de enchimento. Esses modelos são continuamente ajustados para que se tornem estimadores acurados. A técnica usada para isso é chamada “filtro de Kalman”, técnica que tem sido amplamente utilizada para aplicações avançadas em controle de processos, tais como direcionamento de mísseis, etc. O filtro de Kalman ajusta os coeficientes do modelo para minimizar o erro entre a última estimativa e o dado real. Com os modelos de balanço populacional, tem-se um modelo do processo cujos termos tem significados físicos ou são significantes para o processo e podem ser usados como “soft sensors” na estratégia de controle.

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. Para cada modelo de balanço de massas, as variáveis observadas incluem:

- Pressão dos ciclones,
- Densidade da polpa de alimentação dos ciclones,
- Potência do moinho.

Todas entradas são testadas e validadas no sistema especialista e no módulo estatístico do OCS antes de serem usadas pelo modelo dinâmico.

A figura abaixo mostra o esquema de funcionamento do modelo dinâmico

Implementação do Modelo

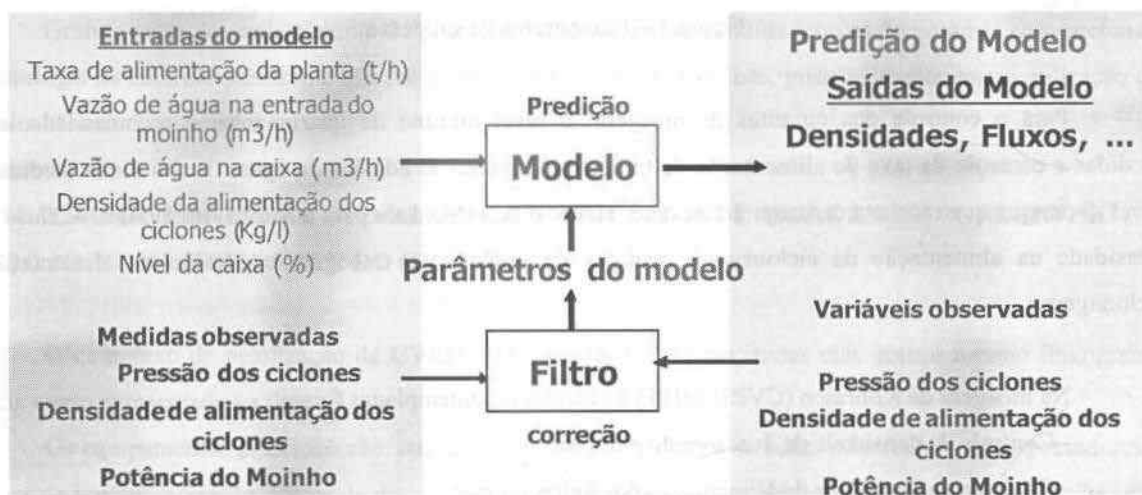


Figura 2 – Implementação do Modelo

A figura a seguir ilustra o circuito de moagem da Kobrasco:

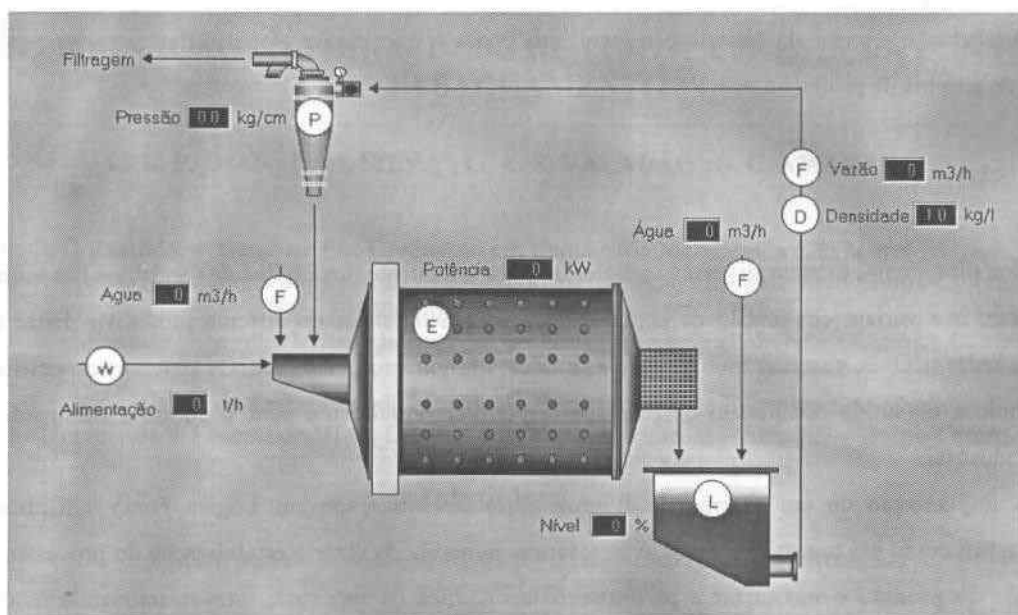


Figura 3 – Circuito de Moagem da Kobrasco

Além do controle de densidade da descarga do moinho, que ajusta a adição de água na entrada do moinho, foram implementados os controle de densidade de alimentação da ciclonação, o controle de adição de cypelbs para manutenção da potência do moinho no nível ajustado e o controle de superfície específica do produto da moagem, ajustando a alimentação nova do circuito de moagem.

O teste "on-off" do sistema na moagem da Kobrasco indicou um aumento de produção de 4%, quando comparado com o controle convencional apenas.

O sistema está atualmente em fase de implantação para o controle das outras linhas de moagem e dos fornos das usinas da CVRD DIPE.

Na moagem de minério de ferro de Timbopeba ainda foi contemplado o controle da pressão de alimentação da ciclonação através da manipulação de válvulas para abrir ou fechar ciclones.

Os resultados obtidos pela implantação do sistema, feita em 1999, foram muito bons. Foi obtido um aumento de produtividade de 2%, com uma redução de 9% na carga circulante da moagem, além da maior estabilidade operacional do processo de concentração como um todo.

SISTEMA DE CONTROLE POR TODA A PLANTA

A lucratividade de uma indústria como um todo é função da tonelagem produzida, da qualidade do produto final, da utilização otimizada de energia e dos custos operacionais.

A otimização na indústria significa a utilização da tecnologia disponível para maximizar o lucro global, quando isto depende de vários objetivos localizados, associados às várias etapas da cadeia produtiva.

A otimização da indústria como um todo determina Valores de Referências locais simultaneamente para várias áreas da cadeia produtiva, levando em consideração todas as restrições conhecidas. O fator limitante tipicamente não se origina sempre da mesma parte da indústria.

A evolução a partir da “otimização localizada” para a otimização global reflete uma percepção mais integrada do sistema de produção.

CONCLUSÃO

Nos dias atuais, existem diversas tecnologias para o controle dos efeitos de distúrbios nas variáveis de um processo, que variam em função da complexidade e características do sistema produtivo. Estas técnicas incluem as redes neurais, sistemas multivariáveis, modelos fenomenológicos etc. Os sistemas especialistas com lógica nebulosa embutida completam os recursos disponíveis atualmente para o controle otimizado de um processo industrial.

A implantação de um sistema de controle otimizante baseado em Lógica Fuzzy em circuitos de moagem, assim como em outros processos, é uma forma garantida de obter a estabilização do processo, garantir a qualidade do produto e maximizar a performance econômica da indústria, inter-relacionando os objetivos localizados e visando a lucratividade do empreendimento como um todo.

REFERÊNCIAS

- HERBST, J.A.; OBLAD A.E., “Industrial Results Using Model-Based Expert System Control of Mineral Processing Plants”.
- HERBST, J.A.; RAJAMANI, K.– “The Application of Modern Control Theory to Mineral-Processing Operations”. Proceedings, 12TH CMMICONGRESS, Johannesburg, S. África, 1982.
- MARTINS, M.A.S; SEIXAS, F. – “Avanços no Controle e Supervisão de Processos Mineraiis”. ENCONTRO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 1992.
- VLEN, A., Edwards R.P., PERRY, R., e FLINTOFF B.C. – “Back to the Basics in Process Control”, 1996.