

CONTROLE PREDITIVO NA OTIMIZAÇÃO DE MOINHO SECADOR DE CARVÃO NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO¹

Luciano França Rocha²

Cláudio José Barcelos Dal'col³

Gabriel Queiroz⁴

Joaquim Ferreira Guimarães Neto⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a redução da variabilidade no processo de moagem de carvão e, principalmente, o aumento da alimentação média do moinho obtido através do otimizador embutido. O carvão é um importante insumo numa planta de pelletização, tendo como uma de suas funções garantir o aporte térmico necessário dentro da pelota, formando as pontes de escória. Além disso, contribui para a redução do consumo de óleo combustível, que, atualmente, tem o custo mais elevado no processo de endurecimento. Na implementação deste controle, foi empregada a técnica de controle preditivo com uma camada de otimização. Na estrutura do controle, foram utilizadas como variáveis manipuladas três válvulas para realizar o controle do fluxo e da temperatura dos gases, e uma correia alimentadora. O controle preditivo mostrou-se bastante robusto nesta aplicação, que possui distúrbios medidos, não medidos e acoplamento entre variáveis. Também foi observado que não é necessário um modelo muito exato para que o controle tenha um bom desempenho ao longo do tempo, o que caracteriza uma boa robustez mesmo com pequenas mudanças nos modelos dinâmicos do processo a ser controlado. Utilizando a malha de controle em modo automático, foi observada uma redução da variabilidade nas principais variáveis de processo em torno de 70% e um aumento da alimentação média da ordem de 8%.

Palavras-chave: Controle preditivo; Processos; MPC; Otimização.

MULTIVARIABLE PREDICTIVE CONTROL WITH FEED OTIMIZATION ON A COAL MILL

Abstract

This work objective the reduction of variability in the coal grinding process and, mainly, an increasing of the average feeding to the coal mill through by the optimizer embedded. The coal is an important additive in a pelletizing plant, providing a necessary thermal contribution in order to guarantee the sintering reactions, forming the scoria bridges. In addition it contributes to the reducing oil consumption that, currently, has the highest cost in the indurating process. In the implementation of this control strategy was used the technical of model predict control and an optimization layer. In the control structure, were used, like manipulated variables, three valves to control the gas flow and temperature, and a feeding conveyor belt. The predictive control technique has been shown very robust at this application, which has measured disturbances, unmeasured disturbances and coupled variables. In addition, it was observed that is not mandatory an exact model in order to have a good performance in a long term period, that means a good robustness even with little changes in the dynamic process models that need to be controlled. Using the control loop in automatic mode was noticed a reduction 70% in the main process variables and an increasing of 8% in the average feed rate.

Key words: Control; Predictive; Automation; Process; MPC; Optimization.

¹ *Contribuição técnica ao 14º Seminário de Automação de Processos, 6 a 8 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.*

² *Engenheiro de Automação – Samarco Mineração*

³ *Engenheiro de Automação – Samarco Mineração*

⁴ *Técnico de Controle de Processos – Samarco Mineração*

⁵ *Consultor Técnico em Controle de Processo – Op2B Otimização Industrial*

1 INTRODUÇÃO

Este artigo relata a experiência na concepção, desenvolvimento e implementação da tecnologia de Controle Preditivo para a otimização no moinho secador de carvão da planta de pelletização da Samarco Mineração em Ubu/ES.

O objetivo da empresa com este projeto era reduzir a variabilidade do processo e aumentar a capacidade média de moagem de carvão. O carvão é um importante insumo numa planta de pelletização, tendo como função garantir o aporte térmico necessário dentro da pelota, formando as pontes de escória e contribuindo para a redução do consumo de óleo combustível, que tem custo elevado no processo de endurecimento do minério.

1.1 Descrição do Processo e seu Controle

O processo de moagem de carvão consiste em alimentar um moinho secador com um material de alta granulometria para adequá-la ao tamanho necessário ao processo dosagem de insumos nas linhas de mistura.

O moinho de carvão possui dois rolos de moagem fixos e uma mesa rotativa, onde é acomodado o material que entra para ser moído. Os rolos moedores são permanentemente pressionados contra a mesa giratória, desta forma o material que se encontra dentro do moinho é moído e esmagado entre a mesa e os rolos. Um fluxo de gás quente vindo do forno de endurecimento atravessa o moinho no sentido ascendente e é responsável pela secagem e transporte do carvão.

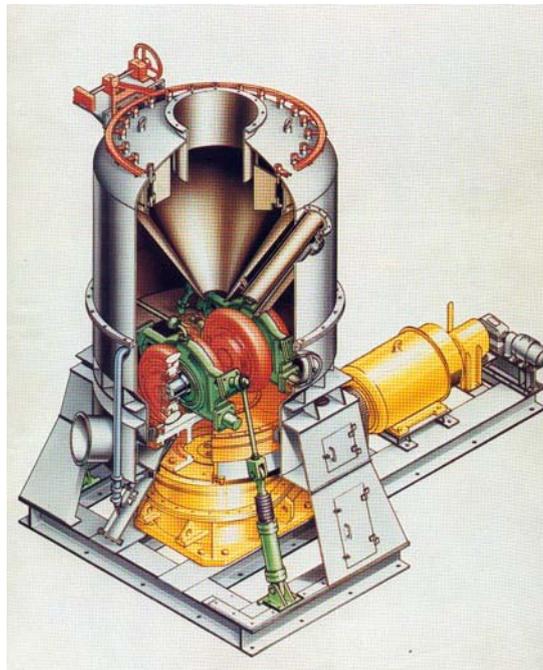


Figura 1- Visão em corte do moinho secador de carvão.

O material seco e moído é transportado pneumaticamente até um filtro de mangas, onde a separação do ar e do produto é realizada. Após a separação ar/sólido o carvão é transportado via um sistema de transportadores pneumáticos para o silo diário de dosagem.

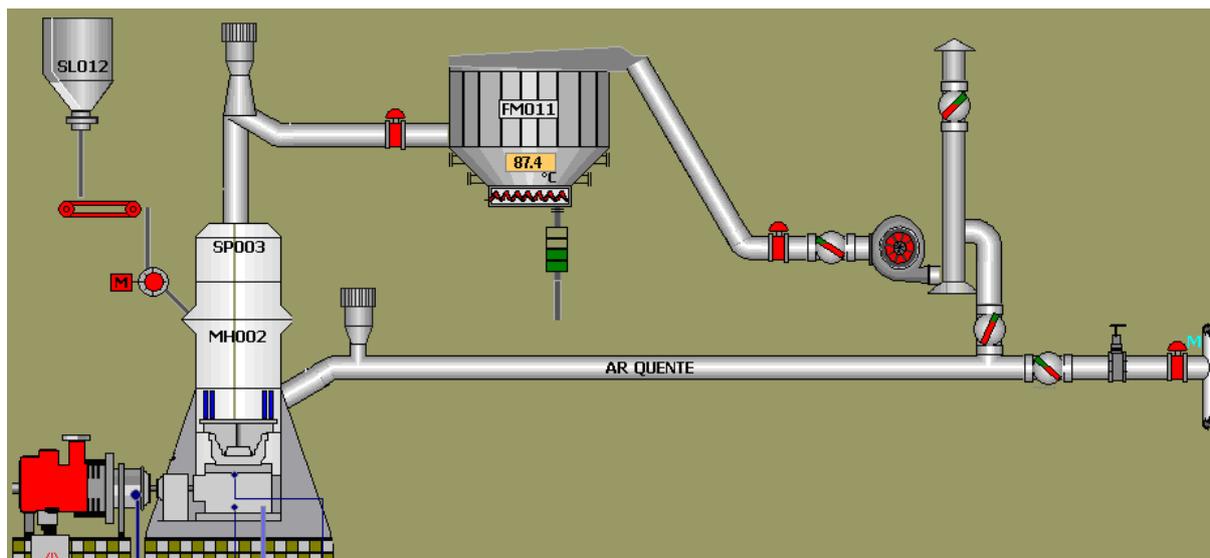


Figura 2 - Visão geral do fluxo de processo.

Para que o processo de moagem e secagem do carvão aconteça adequadamente é importante que se controle o fluxo e a temperatura dos gases. A válvula de gás quente é responsável por controlar o volume de gás proveniente do forno de endurecimento na entrada do moinho. A válvula de retorno controla a recirculação de gases e, com isso, a pressão de entrada do moinho tendo uma pequena influência na temperatura de saída, uma vez que este volume de ar reaproveitado tem uma temperatura menor que a temperatura do gás proveniente do forno. A válvula de chaminé controla o volume de gás que é lançado na atmosfera e também pode ser utilizada para controlar a pressão na entrada do moinho, que deve ser sempre negativa em relação à pressão atmosférica. O *damper* do ventilador também tem influência nas pressões.

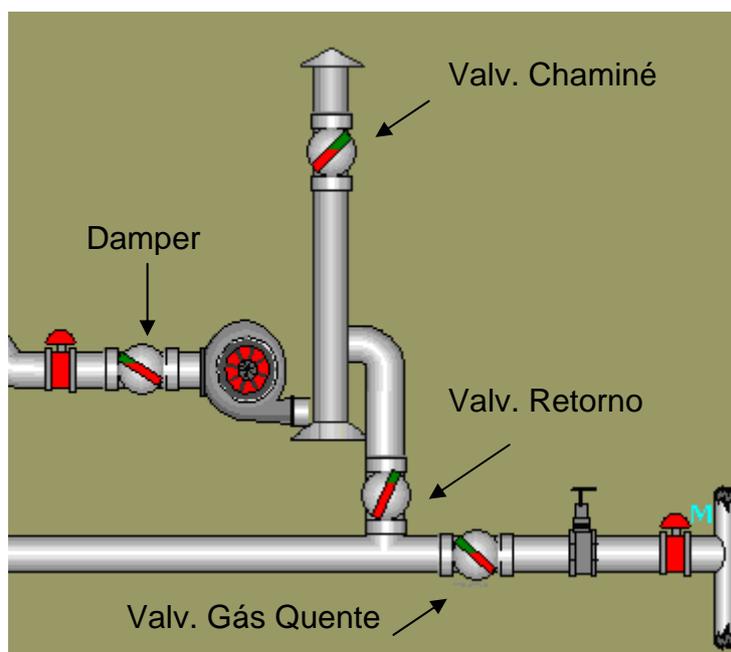


Figura 3 – Principais válvulas de controle do moinho.

No controle convencional do moinho apenas a válvula de retorno e a válvula de gás quente são manipuladas por controladores PIDs, a primeira para controlar a

pressão de entrada do moinho e a segunda para controlar a temperatura de saída em malhas independentes. O *damp*er do ventilador é fechado durante a partida e depois disso posicionado em 60%, e a válvula de chaminé é operada manualmente pelo operador e normalmente deixada em torno de 50% de abertura.

A alimentação é manipulada por outro PID de modo a controlar a pressão diferencial do moinho. O valor da pressão diferencial está diretamente ligado à quantidade de material circulante dentro do moinho, e acima de determinado limite pode levar a um “*embuxamento*”. Esta é a pior situação operacional do moinho e ocorre quando a quantidade de material circulante é grande suficiente para impedir o fluxo de gases dentro do moinho, o que causa uma queda brusca da temperatura de saída, um aumento rápido da pressão diferencial e da vibração do moinho. Nesta situação é possível que alguma condição limite de segurança seja violada e consequentemente o moinho pare de operar.

1.2 Tecnologia de Controle

Devido às características do processo escolhemos para o desenvolvimento deste projeto a tecnologia de Controle Preditivo com Otimização (MPC).

A tecnologia de controle do tipo MPC (*Model Predictive Control*) é mais utilizada atualmente em aplicações (mais de 10.000 no mundo) com características de dinâmica difíceis (tempo-morto, interagentes, não-linear). Esta tecnologia é ideal para controle em casos de sistemas multivariável, compensação de perturbações medidas (*feed-forward*), controle por restrição (*override*) ou para otimização econômica do processo.^(1,2) O algoritmo MPC tem característica preditiva, ou seja, utiliza um modelo interno do processo para prever o comportamento das variáveis dependentes (CV - controladas ou restrições) ao longo de um horizonte futuro de tempo, em função de variações nas variáveis manipuladas (MV) ou perturbações (DV). Este modelo é gerado por meio de testes de variação na própria unidade de processo. Utilizando as previsões futuras das variáveis dependentes, o algoritmo calcula os movimentos necessários nas variáveis manipuladas que minimizem a soma dos erros futuros.⁽³⁾ Estes erros são equivalentes às diferenças entre os valores previstos e a trajetória desejada para estas variáveis.

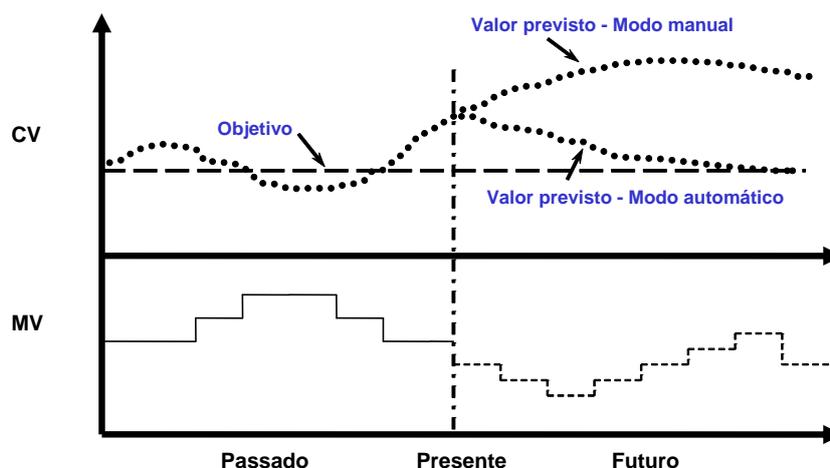


Figura 4 – Ações do controle preditivo.

O MPC permite a otimização do processo usando uma função objetivo, como para este caso, a maximização de capacidade. O algoritmo calcula os valores dos

objetivos (*set-points*) para que a função objetivo seja otimizada respeitando os limites estabelecidos para o processo. Desta forma o processo opera sempre em seu ponto de melhor rendimento econômico.⁽⁴⁾

A Samarco dispõe desta tecnologia de forma integrada como bloco funcional em seu atual sistema digital de controle (SDCD Emerson DeltaV), usando o mesmo hardware, software e padrões de segurança comuns a todos os outros blocos de controle do sistema. Estas características permitem implementações dos projetos com rapidez, economia e confiabilidade superiores quando comparadas às comumente encontradas em outros sistemas convencionais.

2 MÉTODO DE TRABALHO

O correto desenvolvimento de uma aplicação de controle do tipo MPC deve seguir algumas etapas como:

- análise do processo;
- projeto funcional e definição da estrutura de controle;
- pré-teste e revisão do controle regulatório;
- projeto detalhado e configuração do sistema;
- testes e identificação do processo;
- geração, análise e validação dos modelos;
- revisão do projeto e geração do controlador;
- sintonia e testes em simulação; e
- comissionamento e pré-operação.

Para o desenvolvimento deste projeto reuniu-se uma equipe multifuncional, envolvendo dois Eng^o de Automação, um Técnico de Controle de Produção, e um consultor externo com experiência em controle de processos e tecnologia MPC.

A importância desta equipe multifuncional reunindo conhecimento de processo, sistemas, controle e especificamente da tecnologia de controle utilizada (MPC), ficou evidenciada no desenvolvimento do projeto, conseguindo-se superar as dificuldades inerentes e obter um ótimo resultado final em tempo compatível.

2.1 Desenvolvimento do Projeto

Durante alguns dias, discutiu-se exaustivamente o processo de moagem, suas características e suas particularidades. O objetivo era obter dados e conhecimento para propor uma estratégia de controle que fosse adequada à otimização do moinho. A primeira proposta foi projetar um controlador único devido às características fortemente interagentes entre as entradas e saídas de processo, com a seguinte estrutura:

Controladas	Restrições	Manipuladas	Perturbações
Pressão na entrada	Temperatura na entrada	Taxa de Alimentação	Rotação do Ventilador
Temperatura na saída	Pressão diferencial	Válvula de Gás Quente	
	Temperatura dos rolos	Válvula de Retorno	
		Válvula da Chaminé	

Esta abordagem teria o problema de misturar variáveis dependentes (controladas e restrições) com respostas dinâmicas muito diferentes como pressões e temperaturas. O controlador MPC disponível no SDCD, como a grande maioria, usa período de amostragem único para todas as variáveis, proporcional ao tempo

de estabilização da variável com dinâmica mais lenta. Isto poderia levar a um controle deficiente para as pressões (variáveis mais rápidas), porém decidiu-se por testar esta estrutura mesmo assim.

A instrumentação existente foi previamente verificada e as malhas de controle PID sintonizadas pela equipe de Automação da Samarco.

Para quantificação dos modelos foi inicialmente usada uma ferramenta para identificação automática de processo, disponível no SDCD. Esta ferramenta aplica pulsos pseudo-aleatórios (PRBS) em todas as manipuladas de forma simultânea. Os resultados não foram aceitáveis, apresentando uma baixa correlação com os dados reais e respostas dinâmicas conhecidas do moinho, provavelmente devido à ocorrência de perturbações não medidas durante os testes.

Decidiu-se então pela identificação manual do efeito em cada variável de restrição ou controlada, a partir de uma variação em degrau em cada manipulada. Com as malhas de controle em modo manual, esperou-se a estabilização do processo e aplicou-se uma variação em degrau em uma manipulada, repetindo-se o procedimento para todas. Ao final dos testes os dados foram trabalhados matematicamente e forneceram os parâmetros para modelos de primeira ordem em série com um tempo morto. Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos identificados

Entradas / Saídas de Processo	Alimentação			Válvula da Chaminé			Válvula de Retorno			Válvula de Gás Quente		
	T_M (s)	Kp	T_{S1} (s)	T_M (s)	Kp	T_{S1} (s)	T_M (s)	Kp	T_{S1} (s)	T_M (s)	Kp	T_{S1} (s)
Temperatura de Saída	60	-0,47	180	60	0,05	120	60	-0,03	150	60	0,80	120
Temperatura dos Rolos	60	-0,40	180	60	0,02	120	60	-0,01	150	60	0,05	120
Temperatura de Entrada				60	0,05	120	60	-0,30	180	60	0,60	120
Pressão na Entrada	30	0,08	20	5	-0,30	10	5	0,25	10	5	1,30	10
Pressão Diferencial	30	0,08	20	5	0,10	10	5	0,13	10	5	0,70	10

Os modelos acima apresentaram grandes diferenças nas dinâmicas (constantes de tempo) das pressões (10 segundos a 20 segundos) e temperaturas (120 segundos a 180 segundos). A pré-operação deste controlador mostrou um comportamento adequado para o controle de temperatura, porém pouco efetivo para o controle da pressão, confirmando nossa suposição inicial.

Decidiu-se então revisar a estrutura do controlador de forma a separar os módulos de controle, ou seja, criar um controlador para a pressão e outro para a temperatura. Desta forma, o tempo de amostragem de cada controlador MPC seria adequado a dinâmica de cada variável importante ao controle do moinho. O desacoplamento entre os dois controladores é obtido pelo uso das saídas de controle de um módulo como perturbações do outro. A figura 6 mostra a estrutura de controle definitiva que foi utilizada.

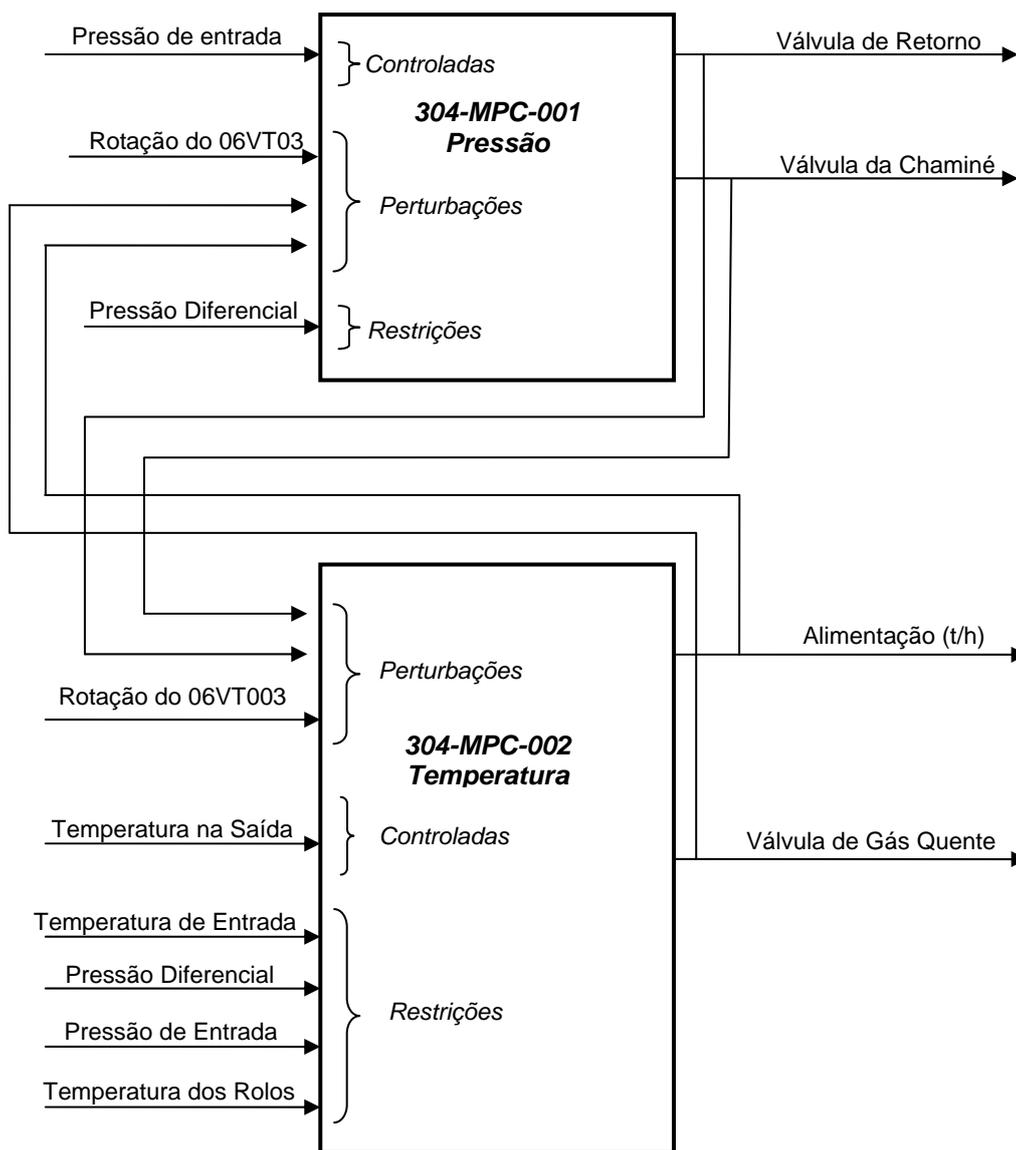


Figura 6 - Estrutura final dos controladores.

Durante o comissionamento do controlador observou-se alguma instabilidade no controle da pressão diferencial do moinho quando este operava com alimentação próxima ao limite máximo nominal. Como este modelo foi levantado com uma alimentação menor, conclui-se que o ganho do processo era diferente do ponto de operação no qual foi levantado o modelo. Outro teste de resposta ao degrau foi realizado em um ponto bem próximo ao máximo do moinho. Carregou-se o controlador com o novo modelo obtendo-se uma operação estável.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Durante o primeiro mês de operação observou-se que a estabilidade do moinho aumentou significativamente. Mesmo durante os períodos de parada do forno (fonte de gás quente para o moinho), o moinho conseguia controlar a pressão de entrada e manter a temperatura de saída no *set-point* de operação, sem reduzir a alimentação média, durante um período de até 30 minutos. Após esse tempo a temperatura começava a cair e, por consequência a alimentação. É importante

observar que o processo de moagem tinha anteriormente sua operação interrompida frequentemente durante paradas do forno de endurecimento.

Considerando apenas período após moinho já em funcionamento por pelo menos 30 minutos, foi feita uma comparação estatística entre as variáveis de maior importância para o moinho para avaliar ganhos relacionados à variabilidade e ao aumento da alimentação média. A comparação entre o controle preditivo ligado e o controle convencional ligado, utilizando dados adquiridos durante o período de um mês, mostra que os ganhos são consideráveis (Tabela 2).

Tabela 2 – Redução de variabilidade e aumento de produção média

	Antes	Depois	Ganho
Alimentação média (ton/h)	23,25	24,97	+7,4%
Desvio na Temperatura de Saída (° C)	3,67	1,48	-59,6%
Desvio na Pressão de Entrada (mbar)	6,82	1,40	-79,5%

Os próximos passos para a sustentabilidade dos resultados foram o treinamento de toda equipe envolvida na operação da planta de moagem e a avaliação contínua do desempenho do controle MPC. Algumas estatísticas, como indicadores de variabilidade, percentual do tempo que o controle MPC está em operação e a alimentação média do moinho, são monitoradas constantemente para confirmar se a operação do controle avançado está adequada ou não às necessidades operacionais.

Os gráficos das Figuras 7 e 8 são cópias da tela de operação do controlador MPC. A linha em vermelho mostra a tendência da pressão diferencial do moinho. A área cinza mostra os dados do instante presente em direção ao passado e a área verde a previsão futura calculada. No instante retratado em 7 o controlador está prevendo que às 11h a pressão diferencial estará em 62,7 mbar caso não aconteça nenhum distúrbio não medido. Pode-se ver na Figura 8 que a previsão se concretizou com uma margem pequena de erro, o que caracteriza que os modelos estão bastante adequados para a aplicação.

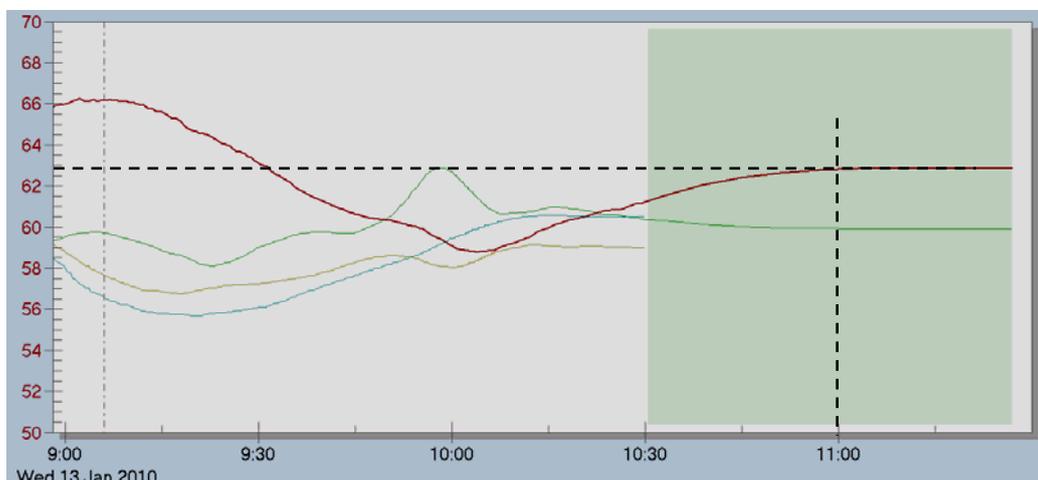


Figura 7 - Previsão para a pressão diferencial. Atingirá 62,7 mbar às 11h.

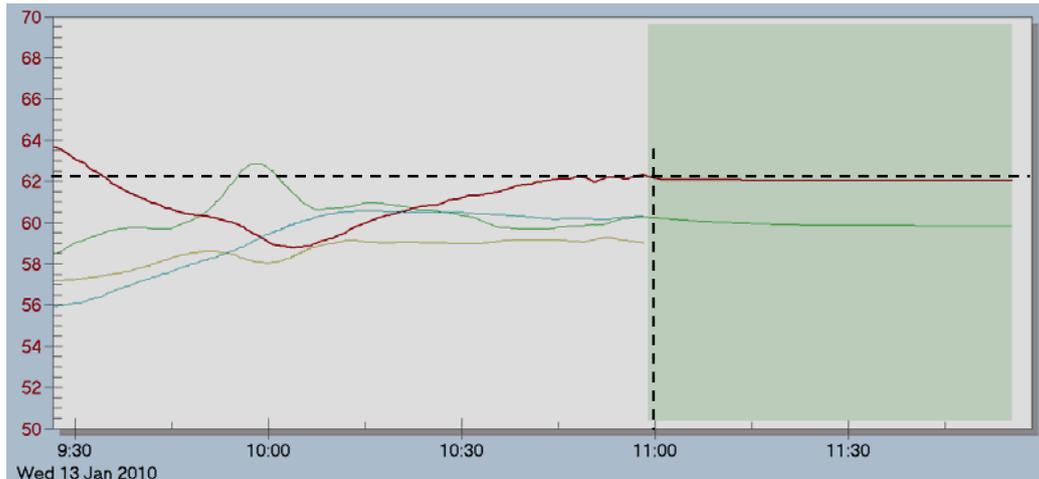


Figura 8 - Pressão diferencial em 62,3 mbar às 11h.

4 CONCLUSÕES

A utilização de controle preditivo representou uma excelente oportunidade para atingir níveis inéditos de estabilidade mesmo em grandes distúrbios. Além disso, o controle preditivo com modelo de primeira ordem em série com um tempo morto apresentou um alto nível de confiabilidade e robustez, sendo pouco sensível a mudanças comuns do processo.

O otimizador embutido é o grande diferencial quando aplicado em conjunto com o controlador. Apenas a redução de variabilidade em si não traz grandes vantagens econômicas quando não está associada a um aumento de uma produtividade ou redução de algum custo. Esta ferramenta é fundamental para extrair o máximo de ganhos de uma aplicação de controle avançado.

É importante destacar o desempenho e a disponibilidade da equipe operacional neste trabalho que foi fundamental para o sucesso do projeto. A atitude dos operadores, técnicos e engenheiros, em participar dos testes de identificação, sugerir melhorias no controle, participar das reuniões ativamente, observar as questões de segurança das pessoas e dos equipamentos envolvidos durante a implementação deste controle, é digna de elogios e fundamental para que outras áreas da empresa possam atingir o nível de automação que hoje é realidade na planta de moagem de carvão.

Finalmente, é extremamente importante estudar aplicações dessa tecnologia em outras partes do processo produtivo. Existem outros processos na Samarco que, possivelmente, o controle preditivo tem grande potencial de aplicação e, com certeza, serão estudados futuramente.

Agradecimentos

Os agradecimentos são feitos especialmente ao técnico de controle de produção Gabriel Queiroz, que se dedicou quase totalmente ao projeto durante a sua implementação, aos engenheiros de processo e produção pela contribuição técnica e ao corpo gerencial, especialmente na área de automação e no departamento no qual este trabalho foi desenvolvido, que providenciou todos os recursos necessários.

REFERÊNCIAS

- 1 Guimaraes, Joaquim F., “Usar Controle Avançado é fácil... e lucrativo!”, Revista Intech Brasil, outubro/2006 (www.op2b.com.br).
- 2 Guimaraes, Joaquim F., “Aplicação de controle multivariável preditivo com otimização em unidade de grande porte”, Congresso Internacional de Automação Sistemas e Instrumentação (ISA), São Paulo, outubro/2001 (www.op2b.com.br).
- 3 Blevins, Terrence, “Advanced Control Unleashed: Plant Performance Management for Optimum Benefit”, Research Triangle Park, ISA – The International Society of Automation, ISBN 1-55617-815-8.
- 4 EMERSON, DeltaV Books Oline 10.3: Copyright © 1994-2009, Fisher-Rosemount Systems, Inc. All Rights Reserved.