

OTIMIZAÇÃO DAS PRENSAS DE ROLOS NA LINHA DE BENEFICIAMENTO DE PELLET-FEED: CONTROLE DE TORQUE PARA ESTABILIDADE DA QUALIDADE E REDUÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS¹

Marcos Vinícios da Silva Cavalcante²

Resumo

O objetivo deste trabalho foi alcançar estabilidade nos resultados de qualidade oriundos da planta e reduzir os gastos operacionais. Teve como metodologia, baseada em estatística, a avaliação das variáveis de processo usadas como referência no controle da planta. Basicamente este trabalho buscou encontrar mecanismos e outras variáveis de controle capazes de maximizar a eficiência da planta e minimizar o consumo específico de energia elétrica. Como resultado do trabalho verificou-se o aumento significativo da estabilidade dos resultados após a prensa de rolos, sobre tudo os itens *blaine* e *mash* e redução no consumo de energia elétrica gasta nas operações de prensagem de pellet-feed.

Palavras-chave: Otimização; Prensas de rolos.

OPTIMIZATION OF THE ROLLER PRESS ON LINE OF PROCESSING OF PELLET FEED: CONTROL OF TORQUE TO ESTABILITY OF THE QUALITY AND REDUCE THE OPERATION COST

Abstract

The purpose of this paper is to show how to keep stability in the results of quality from the plant and to reduce operating expenses. It had as methodology, based on statistic, the assessment of the used process variables as reference in control of the plant. Basically this paper sought to find mechanisms and others variables to be able control and maximize the efficiency of the plant and reduce the specific consumption of electric energy. How results this paper had a significant stability of the results after roller press, over all about items *blaine* and *mash*, and reduction in the consumption of electric energy spent in the operations of pellet feed pressing.

Key words: Optimization; Roller press.

¹ Contribuição técnica ao 13º Seminário de Automação de Processos, 7 a 9 de outubro de 2009, São Paulo, SP.

² Engenheiro de Controle e Automação, locado na Gerência de Engenharia de Processo e Automação da Samarco Mineração, na unidade Ubu – E.S – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

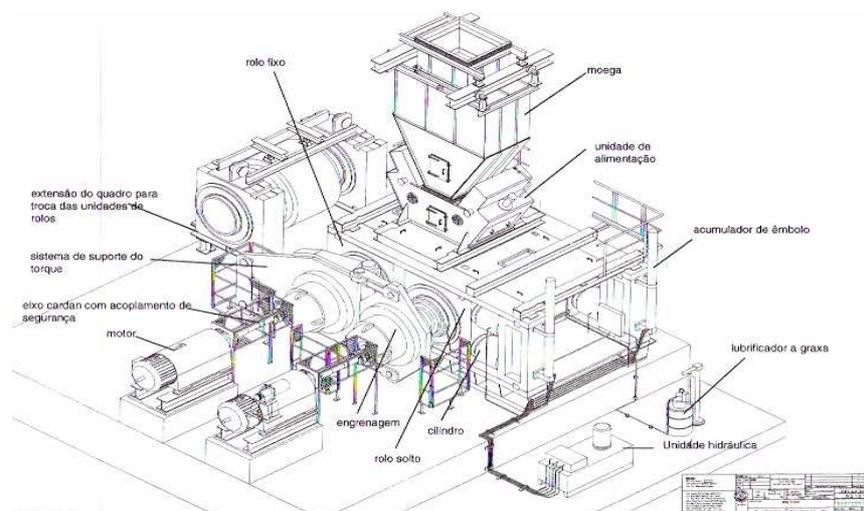


Figura 1: Prensa de rolos, desenho fornecido pelo fabricante.

As atuais pensas de rolos, como visto na Figura 1, operam na Samarco Mineração desde meados de 2003, localizadas após a filtragem, foram projetadas para processar 1000 TMN/H de pellet-feed. Com o passar do tempo com outras otimizações em outras etapas do processo, mais precisamente em meados de 2005 a alimentação das prensas de rolos chegaram em média em 1.200 TMN/H. Além disso, diversas sobrecargas ocorriam neste período em função da falta de controle da rotação dos rolos, gerada pelas alterações repentinas de percentual de umidade e da alimentação em função da demanda. Uma variável de controle muito importante na produção de pellet-feed moído é o blaine, também chamada de superfície específica é média da população de partículas do minério de ferro concentrado, quanto maior a superfície específica média é verdade falar que maior é a energia superficial da população de partículas, favorecendo o processo de pelotização. Por outro lado, superfície específica é gerada pela cominuição do concentrado do minério de ferro, que contribui expressivamente para o custo de produção de pellet-feed moído. A rentabilidade de um empreendimento de produção de pelotas é portanto uma função consideravelmente sensível à superfície específica também conhecido como blaine do pellet-feed moído, ou seja, a relação custo/benefício ótima está associada a um valor de superfície específica suficientemente alto para que o processo de pelotização seja eficiente.⁽¹⁾ A partir do exposto é fácil entender que a prensa de rolos passou a significar um gargalo na produção, demandando assim atenção e esforços da engenharia de processo e automação. No início deste trabalho a prensa de rolos operava com set-points remotos de pressão nos rolos e a principal referência de controle era a potência requerida pelo acionamento dos motores dos rolos, e a interação desta variável era feita de forma manual, ou seja, malha aberta. A otimização das prensas de rolos teve como objetivo alcançar estabilidade nos resultados de qualidade oriundos da planta e reduzir o consumo específico de energia elétrica através do controle do torque, variável indicada a ser controlada pelo estudo, do acionamento dos motores dos rolos, já que foi percebido que muitas vezes a planta operava com excelentes níveis de potência e os resultados muita das vezes não eram satisfatórios.

2 MÉTODOS E MATERIAIS

2.1 Metodologia

Foi empregada a metodologia do PDCA,⁽²⁾ metodologia baseada em planejamento, execução, avaliação e atuação contínua.

2.1.1 Etapas de planejamento

- **O problema:** a referência de controle representada pela potência não era suficiente para garantir o desempenho da planta;
- **Observações:** fatos e dados e brainstorming focando o funcionamento da real da planta; e
- **Análise:** tratamento e filtro de dados relevantes ao processo.

As sub-rotinas foram realizadas nesta etapa: levantamento das variáveis relevantes, definição da população amostral, preparação da população amostral, realização de correlações, definição das correlações relevantes.⁽³⁾

Ferramentas utilizadas: MS Excel, MINITAB⁽⁴⁾ e Plant Information management system - PIMS como banco de dados.

- **Plano de ação:** criação da aplicação “Controle dinâmico de torque”, preparação de modelos matemáticos^(5,6) e definição de lógicas.

Foram utilizados os softwares Scilab,⁽⁷⁾ MS Excel.

2.1.2 Etapa de execução

- **Execução do Plano de ação**

Ferramentas utilizadas: sistema atual de automação AC800XA, software Scilab, MS Excel e PIMS como banco de dados.

2.1.3 Etapa de verificação

- **Confirmação da efetivação do plano de ação**

Ferramentas utilizadas: análise estatística de resultados e avaliação de desempenho. Foram utilizados os softwares MINITAB e MS Excel.

2.1.4 Etapa de atuação

- **Padronização.**

Atuação corretiva e ajustes para padronização através da análise de desempenho da planta.

Ferramentas utilizadas: sistema atual de automação dedicado a planta o AC800XA, Software Scilab, e o software MINITAB.

2.2 Materiais

Os testes foram realizados nas próprias plantas instaladas na Samarco Mineração, com apoio de simulações baseadas nos modelos encontrados neste trabalho.

3 RESULTADOS

3.1 Variáveis Relevantes

Tabela 1: Variáveis relevantes ao estudo

| Variável de processo | Representação (Unidade) |
|---|-----------------------------|
| Potência | P (%) |
| Velocidade de rotação dos rolos | Fr (%) |
| Torque | T (%) |
| Vazão de alimentação dos rolos | V (TMN/H) |
| Gap de trabalho | GT (mm) |
| Gap Zero | GZ (mm) |
| Pressão exercida nos rolos | Pr (Bar) |
| Coeficiente de escorregamento superficial nos rolos | $C\eta$ |
| Umidade do Pellet-Feed | H2O% (%) |
| Blaine (Superfície específica) | Blaine (g/cm ²) |

As grandezas Potência, Torque e Rotação medidos na planta foram padronizados em percentual para realização dos modelamentos.

3.2 Correlações entre o Processo e os Modelos Matemáticos Encontrados

Considerando as atuais instalações da prensa de rolos instaladas na Samarco Mineração, foi observado que:

Relação A, Fr é uma função da razão entre a alimentação e o Gap de trabalho: $f(V / GT)$

Relação B, GT é uma função da alimentação e a pressão nos rolos: $f(V / Pr)$

Fazendo a relação B em A , temos:

$Fr = f(V / (V / Pr))$, **$Fr = f(Pr)$** ou seja, a Fr é uma função direta da pressão exercida nos rolos.

Antes deste estudo o Gap de Trabalho (GT) era tido como um parâmetro de importantíssimo no controle do processo, depois deste estudo passou a ser uma variável de baixa significância no controle da prensa de rolos e tornou-se uma boa referência para manutenção preventiva dos rolos.

- Nota 1: A velocidade de rotação dos rolos (Fr) é uma função direta da pressão exercida nos rolos.

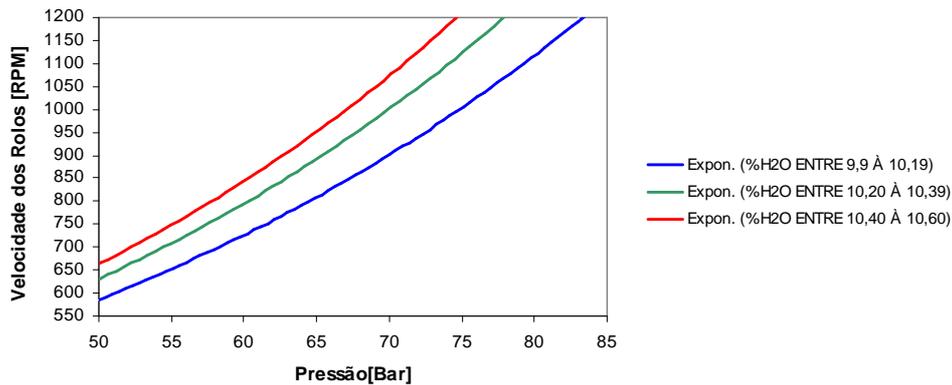


Figura 2: Relação entre a Pr e a Fr , considerando alimentação constante em 1000TMN/H em três faixas distintas de percentual de umidade no pellet-feed.

- Nota 2: A velocidade de rotação (Fr) responde de forma exponencial e está diretamente ligada ao percentual de umidade no pellet-feed.

MODELO 1: Rotação dos rolos: $Fr(Pr) = 200 * \exp(C\eta * Pr)$
 Para o coeficiente de escorregamento $C\eta$ constante.

Onde $C\eta$ é o coeficiente de escorregamento superficial nos rolos, que é provocado pela umidade inerente no pellet-feed responsável em formar uma película temporária sobre a superfície dos rolos, responsável pela redução do atrito entre os rolos e o pellet-feed, ocasionando o aumento da rotação nos rolos em função do controle do nível do silo de alimentação. Para processos onde a qualidade e a quantidade de alimentação de pellet feed são constantes a pressão de trabalho também será constante, mas caso contrário é necessário um controle que permita a busca contínua pelo equilíbrio entre a pressão exercida nos rolos, rotação dos rolos e alimentação de pellet feed.

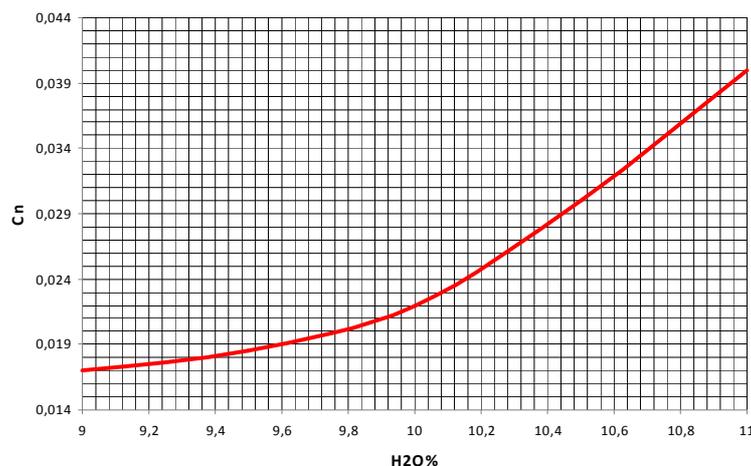
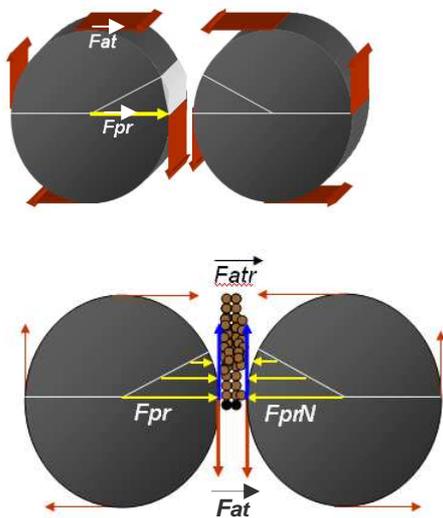


Figura 3: Relação entre umidade e o coeficiente de escorregamento.

MODELO 2: Coeficiente de escorregamento:
 $C\eta (H2O\%) = 0,00032 * \exp(0,439 * H2O\%)$

Para pressão constante.

O processo, de prensagem de pellet-feed com a prensa de rolos, é composto por forças que são responsáveis pela quebra da partícula nas quais são explicadas abaixo:



F_{at} – é a força de aceleração necessária para alterar a velocidade.

F_{pr} – é a força exercida pelo hidráulico nos rolos.

F_{atr} – é a força de atrito exercida pelo contato do pellet-feed com a superfície dos rolos, em módulo é igual a F_{at} , pois se trata da desaceleração dos rolos. Quando a F_{atr} aparece desestabiliza a F_{at} , para compensar a desaceleração é injetada força suficiente no acionamento dos rolos para manter a velocidade constante, esta força adicional é chamada aqui de torque(T).

Então:

- Quanto maior a F_{atr} , maior será o T aplicado ao sistema.
- Se a F_{at} é constante, $F_{atr} \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$

Figura 4: Representação das forças e interações no processo de prensagem de pellet-feed.

Equações levantadas para abordagem do torque:^(8,9)

*Equação 1 : $T = F * L$ (Distância da aplicação da força até centro do movimento rotacional)*

*Equação 2 : $P = (T * Fr) / (60 * 2\pi)$, fazendo $(2 \pi) = K$*

Temos então:

$$P = T * 1 / RPM * K; \quad RPM = \text{Rotação dos rolos (Fr)}$$

por dedução temos:

$$\text{Equação 3 : } T = P * 1 / Fr$$

- Colocando o modelo 1 e 2 no denominador da equação 3:

$$\text{MODELO 3: } T = \frac{P}{\{200 * \exp \{ [0,00032 * \exp(0,439 * H_2O\%)] * Pr \}} * 0,008232}$$

O denominador da equação acima tem um fator que é produto da relação rotacional entre o motor e o rolo associada à mudança de unidade de RPM para percentual (0,008232), em função disso o resultado do torque deste modelo só poderá variar de 0 a 1, qualquer valor fora desta faixa deverá ser desconsiderado.

Considerações importantes:

- A potência (0 a 100 %), umidade(9 a 11 %) e a pressão(0 a 100 bar) são fatores integrantes do controle de torque;
- O torque será diretamente proporcional a potência e inversamente proporcional a rotação dos rolos;
- A potência de forma prática pode ser expressa como o produto do torque pela rotação dos rolos.
- A expressão : $\{200 * \exp \{[0,00032 * \exp(0,439 * H2O\%)] * Pr\}\} * 0,008232$ corresponde a um número entre 0 a 1 onde 1 corresponde a 100% da rotação do acionamento dos rolos, ou seja 1318 rpm.

3.3 Lógica de Controle de Torque

Como o torque sofre diretamente influência da rotação dos rolos e a rotação dos rolos é influenciada diretamente pela pressão realizada nos rolos e pela umidade do pellet-feed, a lógica partiu do princípio que ao controlar o torque através da variação da pressão nos rolos de forma dinâmica, ou seja, garantindo a periodicidade da avaliação e comparação da média do torque do período (t) com a do período (t-1) de forma que se a diferença, ou seja, o delta de torque for positivo, é disparado um incremento de pressão, caso contrário, é disparado um decremento de pressão, conforme pode ser visto na figura 6. Desta forma o controle garante os melhores valores de torque, buscando sempre o ponto ótimo. Os modelos criados no período de estudo não foram aplicados diretamente nesta lógica, por estarem associados ao estado físico da planta que pode sofrer mudanças com o tempo, é importante comentar que ocorrem naturalmente desgastes nos rolos com o passar do tempo, fazendo com que a planta responda de forma diferente aos apresentados pelos modelos, porém os modelos serviram como base de informação para comparações através de simulações para a efetivação da lógica aplicada nas plantas.

3.3.1 A lógica aplicada na planta

A seguir o modelo da aplicação de controle dinâmico de torque utilizado na Samarco Mineração.

OPERAÇÃO AUTOMÁTICA DE CONTROLE DE TORQUE

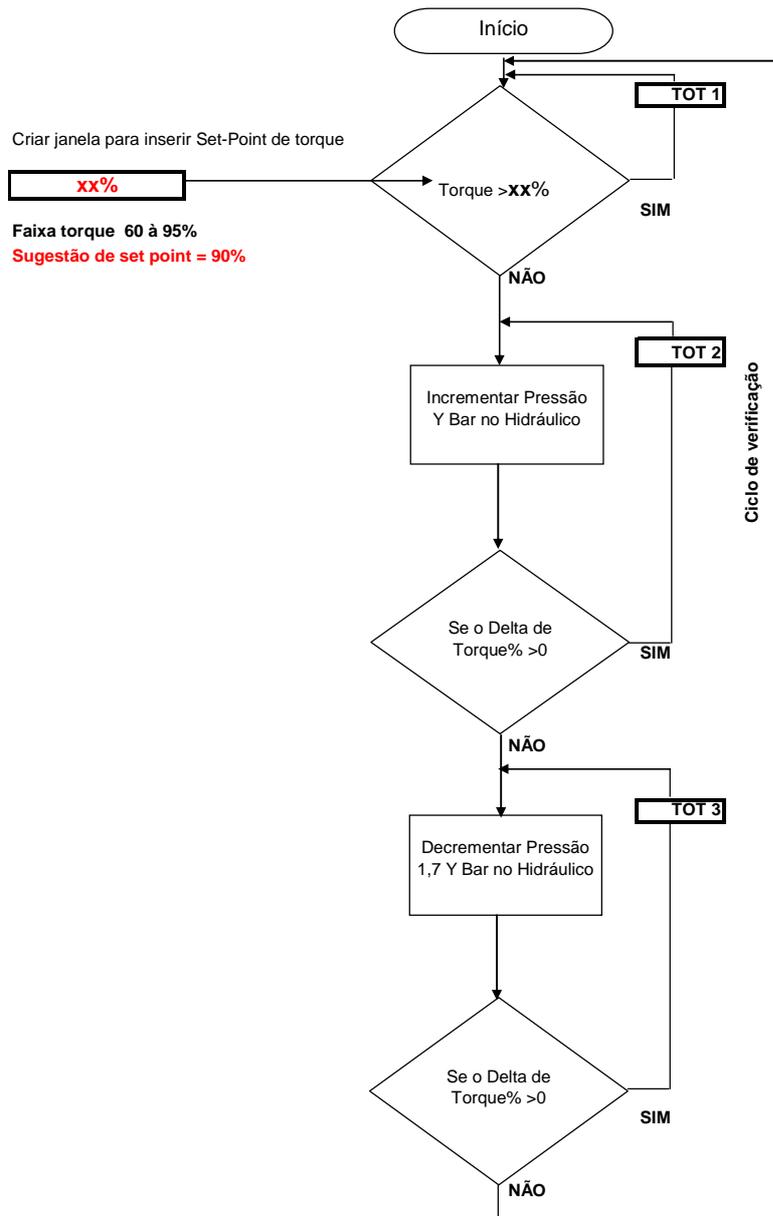


Figura 5: Modelo simplificado da lógica da aplicação do controle dinâmico de torque.

4 DISCUSSÃO

A discussão pode ser iniciada tratando da faixa de pressão aplicada nos rolos após a efetivação do controle de torque. Pode ser notado como mostrado na Figura 6 que a pressão de trabalho aplicada é decrementada assim que a umidade do pellet-feed é incrementada, mostrando que a aplicação de controle de torque é sensível às mudanças de umidade, buscando sempre o melhor ponto de estacionamento da pressão.

Faixa de pressão de trabalho

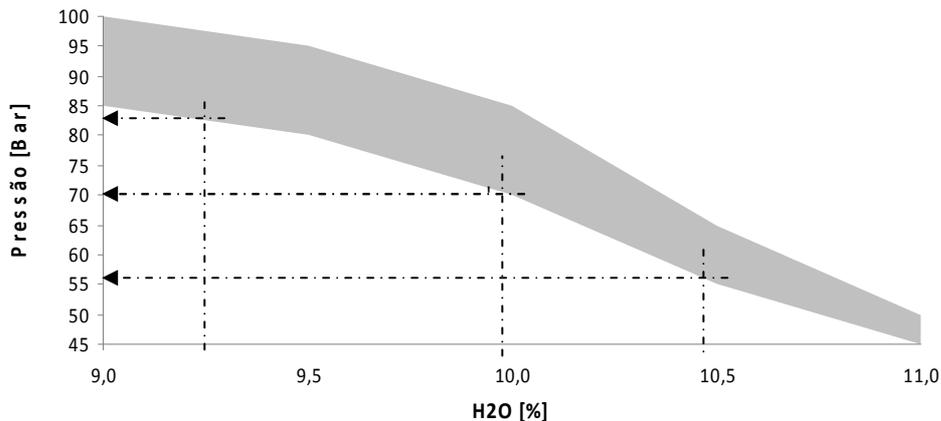


Figura 6: Faixa de pressão de trabalho em função da umidade do pellet-feed, alimentação média de 1200 TMN/H.

Relação entre as variáveis de processo

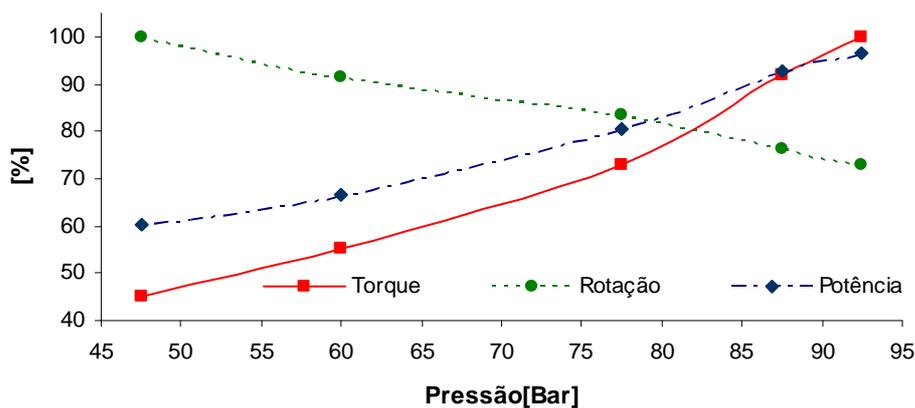


Figura 7: Considerando a Faixa de pressão de trabalho em função da umidade do pellet-feed do gráfico 3, o gráfico 4 mostra a interação média entre as variáveis de processo em função da pressão.

Como a umidade do pellet-feed varia entre 9,5% a 10,5% a faixa de pressão usual fica entre 60 % a 87 % ou neste caso 60 a 87 bar, torque entre 50% a 80%, potência entre 60% a 87% e rotação entre 92% a 78%. É importante frisar que quanto maior o torque significa dizer que maiores são as possibilidades de ganhos nos resultados de blaine, como visto na Figura 4 em 3.2, pois esta grandeza mede o esforço real dos motores para manter a velocidade dos rolos estável, a instabilidade da velocidade dos rolos altera o GT, como visto nas relações A e B em 3.2, alterando a vazão de pellet-feed entre os rolos, e como resposta a isso teremos o aumento de velocidade dos rolos e a redução do torque de trabalho conforme visto na equação 3 em 3.2.

A Figura 8 mostra como a potência a rotação dos rolos e o torque se comportaram nos últimos quatro anos. Podemos observar que em 2005 ocorreu um descontrole entre estas variáveis de processo e só vieram a estabilizar em 2006. Como comentado na introdução deste documento, os trabalhos de otimização iniciaram em meados de 2005 de forma manual e no ano de 2006 o controle de

torque já estava funcionando nas plantas. É importante observar também que a potência foi reduzida em média 20%, considerando o período estudado, representando uma excelente economia em consumo de energia elétrica.

Variáveis de Processo - Prensa de rolos

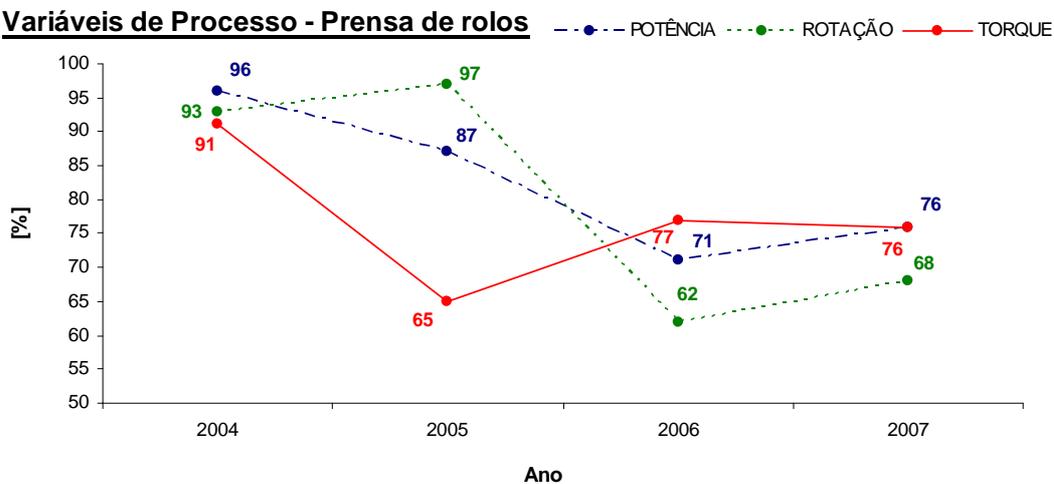


Figura 8: Variáveis de processo.

A Figura 9 mostra como se comportou a umidade do pellet-feed da alimentação e o blaine gerado pelas prensas de rolos durante os últimos 4 anos. É interessante comentar sobre a redução na potência, ou seja, redução de energia elétrica, pois mesmo com o aumento médio na umidade do pellet-feed, os resultados de blaine de saída da prensa de rolos permaneceram acima de 2.070 g/cm², este número foi considerado como referência, pois foi o resultado obtido enquanto as instalações estavam novas.

Variáveis de Processo - Pellet-Feed

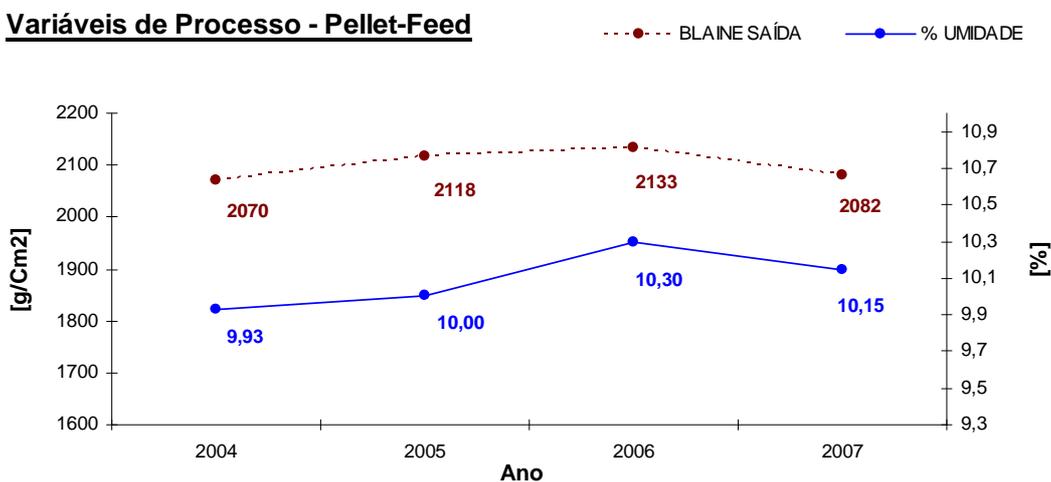


Figura 9: Variáveis de processo.

É importante comentar que existem outros fatores que influenciam no desempenho das plantas, tais como mineralogia do pellet feed, manutenção preventiva dos rolos, limpeza dos rolos, controle do nível dos silos de alimentação, tempo de resposta ao set-point de pressão dos rolos, o gap zero que pode ser traduzido como espaço mínimo entre os rolos enquanto a planta não está sendo alimentada.

5 CONCLUSÃO

Considerando a revisão bibliográfica desenvolvida e análise dos resultados deste trabalho gerado a partir da implantação da aplicação “controle dinâmico de torque” nas prensas de rolos, fica evidenciado que a planta respondeu de forma positiva nos quesitos estabilidade de blaine de saída da prensa de rolos mantendo os resultados acima dos resultados de start-up da planta mesmo com acréscimo de umidade no pellet feed e redução de 20% de consumo de energia elétrica, em função da redução da potência de trabalho. O mash não foi considerado no estudo conforme comentado na introdução, em função de variabilidade deste item na entrada da prensa de rolos no período estudado, no entanto foi observado estabilidade desta variável de processo podendo ser alvo de outro trabalho. Os anos de 2008 e 2009 não foram incluídos no estudo, em virtude de diversos fatores externos que demandaram outros estudos, no entanto as duas plantas e a recente terceira planta de prensagem mantém o sistema de controle por torque ativo, mantendo os bons resultados de qualidade no pellet feed.

Agradecimentos

Agradeço em particular a Samarco Mineração pela oportunidade a mim dada, ao engenheiro de metalurgia Maurício Cota, ao colega de trabalho o engenheiro de automação Renato Gonçalves ao gerente da engenharia de processo e automação Denílson Rodrigues e pela gerência de produção por colaborarem com o sucesso desta pesquisa, me auxiliando tecnicamente e contribuindo para minha dedicação neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Reiner Neumann, Cláudio Schneider. Artigo técnico do CETEM, Considerações sobre geração de superfície específica em minérios de ferro porosos, da XIX ENTMME - Recife, Pernambuco - 2002.
- 2 Cristina Werkema; Sílvio Aguiar, Análise de regressão: Como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo, Editora da FCO, 1ª Edição, 1996.
- 3 Cristina Werkema, Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos, Editora da FCO, 1ª Edição, 1995.
- 4 Marco Siqueira Campos, Desvendando o MINITAB, Editora QualityMark, 1ª Edição, 2003.
- 5 DORF, Richard C. e BISHOP, Robert H, Sistemas de Controle Modernos. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 8ª Edição, 2001.
- 6 OGATA, Katsuhiko, Engenharia de Controle Moderno. Prentice-Hall. 4ª Edição, 2003.
- 7 SCILAB. Disponível em: <http://www.scilab.org>.
- 8 HALLIDAY, David; RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. Fundamentos de Física – Mecânica - volume 1, Editora LTC, 6ª Edição, 2001.
- 9 Torque, Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Torque>.