

CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO INSTANTÂNEA DA VAZÃO DE CARVÃO PULVERIZADO PARA OS ALTOS-FORNOS¹

Ricardo Sebastião Nadur Motta²

Sebastião Jorge Xavier Noblat³

Luíz Edival de Souza⁴

Paulo Santos Assis⁵

Priscylla Angélica da Silva Oliveira⁶

Resumo

O processo de injeção de carvão pulverizado, PCI, assim como o alto-forno é considerado um processo contínuo e não de bateladas. Quanto mais constante e contínua for a vazão de carvão pulverizado, melhor será sua queima no alto-forno. Neste trabalho são definidos novos critérios para a avaliação da variação da taxa de injeção de carvão pulverizado instantânea injetada nos altos-fornos. Foram definidas faixas de tolerância para operação normal do alto-forno e ferramentas matemáticas estatísticas para a monitoração da vazão instantânea de carvão. As análises são efetuadas em tempo real e armazenadas periodicamente pelo próprio sistema de controle do PCI. Estes registros da variabilidade da vazão instantânea de carvão têm sido usados desde o ano de 2001 na CSN para implantação e verificação de melhorias em equipamentos da injeção e novas estratégias de controle.

Palavras-chave: Variação da vazão de carvão; Injeção de carvão pulverizado; Alto-forno.

CRITERIA TO EVALUATE THE INSTANTANEOUS PULVERIZED COAL FLOW VARIATION FOR BLAST FURNACE

Abstract

The Pulverized Coal Injection, PCI, as well as the Blast Furnace, is a continuous process and not batch process. The more constant and continuous is the coal flow; the better will be the combustion in the blast furnace. In this work, it is defined new criteria to evaluate the instantaneous coal flow variation for blast furnace. There were defined tolerance ranges for the blast furnace normal operation and statistical mathematical tools for the instantaneous coal flow monitoring. The analyses are made in real time and stored periodically by the own PCI control system. These registrations of the instantaneous coal flow variability have been used since the year of 2001 in CSN for implementation and verification of improvements in coal injection station and new control strategies.

Key words: Coal flow variation; Pulverized coal injection; Blast furnace.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Estudante de Doutorado em Controle e Automação de Processos na UNIFEI e Engenheiro de Desenvolvimento Senior no Alto-Forno e PCI da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional - Rod. BR 393 - Lúcio Meira km 5001 - S/N. Vila Santa Cecília - Volta Redonda –RJ – Brasil - nadur@csn.com.br; - Tel.: 24 3344-3799. Área de interesse: Automação de processos, Alto-Forno, Injeção de Carvão Pulverizado.

³ Engenheiro de Processo do Alto-Forno e PCI da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional - Rod. BR 393 - Lúcio Meira km 5001 - S/N. Vila Santa Cecília - Volta Redonda –RJ – Brasil - noblat@csn.com.br - Tel.: 24 3344-6166. Área de interesse: Automação de processos, Alto-Forno, Injeção de Carvão Pulverizado.

⁴ Professor na UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. . Avenida BPS, 1303 – CEP: 37500- 000 - Itajubá – MG – Brasil. edival@unifei.edu.br - Tel.: 35 3629-1341. Área de interesse: Controle e Automação de Processos, Modelagem de Sistemas

⁵ Professor na UFOP – Universidade Federal de Engenharia de Ouro Preto. assis@ufop.edu.br - Ouro Preto – MG – Brasil. Área de Interesse: Processo de Alto-Forno e Injeção de Carvão Pulverizado.

⁶ Estudante de Engenharia Elétrica da UNIFOA e Estagiária de Engenharia Elétrica na CSN – Companhia Siderúrgica Nacional - Rod. BR 393 - Lúcio Meira km 5001 - S/N. Vila Santa Cecília - Volta Redonda –RJ – Brasil – priscylla.angelica@gmail.com – Tel.: 24 3344-5198. Área de interesse: Automação de processos, Alto-Forno, Injeção de Carvão Pulverizado

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um processo contínuo de produção onde o minério de ferro juntamente com o carvão é transformado em ferro-gusa a 1.500°C. O processo de injeção de carvão pulverizado, PCI, para os altos fornos através das ventaneiras tem como objetivo substituir o consumo de coque carregado pelo topo do alto-forno, aumentando a produção e melhorando as condições ambientais e econômicas do processo siderúrgico das Coqueria e altos-fornos como um todo tal como detalham Assis e Ishii.^(1,2)

O sistema de injeção de carvão pulverizado – PCI da CSN foi fornecido e comissionado pela BMH - Babcock Material Handling (atual Claudius Peters) em 1997. O PCI possui três estações de injeção (uma para o AF#2 e duas para o AF#3), cada uma com dois vasos trabalhando em ciclos e fases alternadas (carregamento, espera despressurizada, pré-pressurização, pressurização rápida, espera pressurizada, injeção e alívio) de modo a garantir a continuidade da vazão de carvão. Enquanto um vaso está injetando para o Alto-forno, seu vaso complementar está se preparando para injetar.

A Figura 1 ilustra o sistema de injeção de carvão pulverizado completo com planta de moagem e injeção de carvão com dois vasos injetando para um alto-forno.

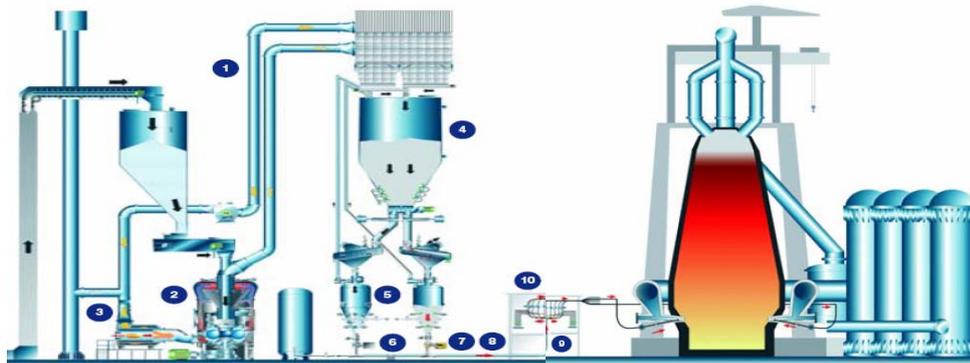


Figura 1. Sistema de injeção de carvão pulverizado.

A vazão de carvão injetada para a queima nas ventaneiras tem que ser a mais constante possível para assegurar a estabilidade da cinética das reações de combustibilidade, preservando o equilíbrio estequiométrico da combustão no *Race-way* dos altos-fornos. A Figura 2,⁽¹⁾ alerta para as conseqüências da instabilidade da vazão de carvão pulverizado na ponta da lança de injeção. Observa-se que ocorrerão momentos em que haverá a falta do carvão com baixa eficiência energética do processo e momentos em que ocorrerá a sobra de carvão provocando uma diminuição na permeabilidade do alto-forno e queima incompleta.

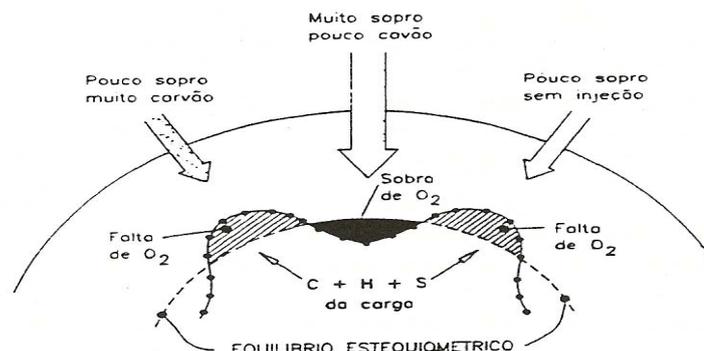


Figura 2. Influencia da variabilidade da vazão de carvão pulverizado em sua queima.

Quando se injeta em taxas elevadas de carvão (> 200 kg/tongusa) a sua distribuição uniforme nas ventaneiras bem com a variabilidade da vazão influencia na estabilidade do processo alto-forno porque cada desvio do set-point da taxa de injeção significa um redução na taxa de substituição, ou seja, um desperdício de uma parte do carvão ou oxigênio injetado e não queimado.

A vazão de carvão pulverizado é uma variável estocástica advinda de um processo industrial contínuo. Para sua análise no tempo tem-se que lançar mão de ferramentas básicas do controle estatístico de processos, bem como a inovação e o cerne deste trabalho que é a análise da variabilidade da vazão de carvão em tempo real a longo prazo. Um analisador de variação de vazão de carvão foi desenvolvido para avaliar as mudanças propostas no processo de injeção bem como diagnosticar defeitos do processo.

O trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta em tempo real para análise da variabilidade da vazão de carvão em períodos de 6 horas. Durante este período, são aquiridos 480 amostras a cada 60 s e o SDCD efetua os cálculos de média, desvio padrão de forma acumulativa. O analisador exibe os resultados de algoritmos matemáticos para cálculo da média e desvio padrão de 480 amostras durante as 8 horas, ou seja, uma amostra a cada 1 minuto. Além disto, ele gera os histogramas probabilísticos da variabilidade da vazão de carvão.

Considerando-se o processo de injeção pedido de 30 [t/h] durante o período de 8 horas, ele pode ser ilustrado pela Figura 3.

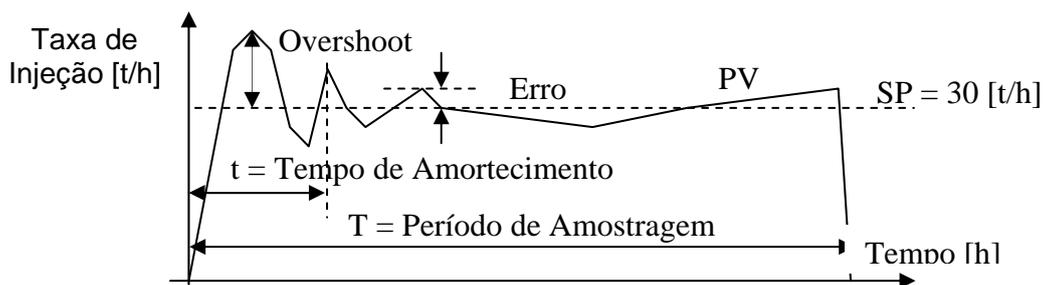


Figura 3. Variação de injeção durante um período de amostragem de 8 horas.

Na Figura 3 pode-se ver o valor ajustado para a taxa de injeção, *set-point*, SP, e a taxa de injeção real, PV, durante o período de amostragem de 8 horas. Quanto menor o erro, diferença entre o SP e a PV do controlador, melhor será a injeção de carvão pulverizado. Idealmente, o valor do erro é zero, ou seja, SP=PV todo o tempo. Porém, isto nunca acontece na prática devido aos ruídos intrínsecos das variáveis de processo que influenciam na vazão resultante de carvão pulverizado através da válvula de dosagem.

O erro de regime permanente, e_{SS} , de uma malha de controle genérica encontrado nas literaturas variam entre 2% a 5%, sendo tomado como valor prático de referência.⁽³⁾ Para análise do desempenho do controle de processo para proporcionar uma vazão de carvão mais estável e constante possível, normalmente tolerado pelo alto-forno de acordo com a experiência operacional é de $\pm 5\%$. Portanto é desejável que durante 100% do período de injeção, o erro em regime permanente, e_{SS} , esteja em dentro da faixa de $\pm 5\%$ ($-5\% \leq e_{SS} \leq +5\%$).

2 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÕES DA QUALIDADE DO CONTROLE

A medição do índice de variação de injeção consiste em saber o qual estável e próximo da quantidade pedida, a vazão de injeção carvão possa estar. As equações a seguir

foram implementadas no SDCD para avaliar e medir a variação de injeção visando ter em registros. Os resultados das ferramentas de análise da variação de uma variável estocástica servirão como base de referência para as diversas pesquisas⁽⁴⁾ e tentativas de otimização do controle de processos.^(5,6) Os itens de controle e parâmetros dos diversos controladores da estação de injeção serão ajustados baseados nos resultados destas ferramentas estatísticas de análise. A observação destes parâmetros associados aos resultados contribui como avaliação após cada mudança realizada no sistema visando uma melhoria na precisão e oscilação das injeções. Existem diversos critérios já estabelecidos no domínio do tempo e outros baseados em margem de fase e ganho. Os critérios mais conhecidos são descritos a seguir.

2.1 Gráficos de Tendência para a Variabilidade da Vazão de Carvão

Por ser a primeira medida a ser realizada antes de muitos planos de ação voltados para a variação de injeção, ela reflete a melhor referência do nível inicial de variação com os atuais. Existem registros referentes desde sua criação em março de 1999. Seus valores atuais referentes às variações percentuais das variáveis de processo são “plotados” nos gráficos de tendência em tempo real e acumulativa com três dias de período.

Foram criados três gráficos em tempo real na escala de tempo de 3 minutos: 22, 23 e 24; e na escala de tempo de três dias: 92, 93, e 94 respectivamente para cada uma das três estações AF#2, AF3.1 e AF#3.2. Assim, pode-se analisar a variação de injeção em tempo real durante a troca de vasos (3 minutos) e a longo prazo para se ter a noção geral do desempenho da estação de injeção/vaso.

Foram adicionadas em cada um dos 3 gráficos de tendência de três dias, 92, 93, e 94, faixas de valores fixos em + 5% e - 5% para criar referências com relação ao desvio percentual calculado real e “plotado” no mesmo gráfico a longo prazo (3 dias). Assim, localizam-se com facilidade os momentos em que a variação de injeção saiu fora da faixa considerada boa.

2.2 Critério da Taxa de Amortecimento

O critério da taxa de amortecimento é o mais empregado na prática do ajuste de uma malha de controle. Basta provocar uma mudança brusca no valor do *set-point* que se pode ver a resposta dinâmica do controle e obter a taxa de amortecimento. Ela tem a vantagem de ser então imediatamente interpretada em gráfico, baseada na razão entre dois picos sucessivos da resposta ao degrau de *set-point*.

A escolha do valor de $a/b < 0,25$ ou $\frac{1}{4}$ para a taxa de amortecimento geralmente é um bom compromisso entre a rápida estabilização e a elevada subida da variável de processo. Normalmente, uma vasta gama de ajustes atinge este objetivo.

Os demais critérios baseados na integral do erro no tempo são mais precisos e seletivos para avaliação da qualidade e estabilidade de um controle de um sistema dinâmico. Neste caso, o ajuste é proporcionado visando-se obter o menor valor possível para as integrais de erro do controlador de processo.

2.3 Critério da Integral do Erro Quadrático - ISE

A integral do erro quadrático segundo a literatura⁽³⁾ penaliza os grandes erros quando ocorrem. Quanto menor o seu valor mais rápido será a reposta de subida do controlador.

2.4 Critério da Integral do Erro Absoluto - IAE

Para uma comparação imparcial do desempenho dos sistemas de controle e transporte pneumático foi implementado um algoritmo de cálculo do IAE – Integral do Erro Absoluto, parâmetro usado para medir o desempenho de controle de processos, tal como citado em Spiegel.⁽⁷⁾ A Equação (1) ilustra o cálculo da área do erro absoluto, IAE, para processos contínuos:

$$IAE = \int |(SP - PV)| dt [kg] \quad (1)$$

2.5 Critério da Integral Mínima do Erro Absoluto e Tempo - ITAE

O ITAE pondera e leva em consideração os pequenos erros que ocorrem a longo prazo após a estabilização e fim do período transitório. Seu menor valor possível favorecerá as respostas dinâmicas com pequenos tempos de estabilização.

2.6 Média e Desvio Padrão

A média e o desvio padrão da taxa de injeção na linha principal de carvão poderão ser calculados como a seguir. A taxa de Injeção média consiste de um cálculo com 60 amostras retiradas de 60 em 60 Seg. Isto totaliza a média móvel da injeção nas últimas oito horas, tal como em anexo. A Equação (2) ilustra como este cálculo é efetuado no SDCD.

$$X = \sum_{n=1}^{60} \frac{x_i}{n} \quad (2)$$

Onde:

- n = numero de amostras usadas no cálculo da média móvel = 60;
- X = média móvel da taxa de injeção; e
- X_i = Valor atual da variável de processo da taxa de injeção;

O desvio padrão será calculado continuamente. Seu valor será registrado em gráficos de tendências para cada estação de injeção dos últimos três turnos. O desvio padrão é calculado como na Equação (3):

$$SD = \sqrt{\frac{(X_i - X)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Onde:

- SD é o Desvio Padrão da medida atual (x_i) com relação à média é calculado junto com a média quando as 480 amostras são completadas.

3 AVALIAÇÕES DA VARIAÇÃO INSTANTÂNEA DE CARVÃO

Entretanto, o principal item que afeta principalmente as malhas de controle de injeção de oxigênio, vapor e gás natural dos altos-fornos cujos *set-points* são cascadeados com a taxa de injeção real, é a variação instantânea de vazão de carvão pulverizado.

Segundo vários pesquisadores da metalurgia dos altos-fornos e a realidade da prática do dia-a-dia no trabalho de manutenção e controle de processo, este é o principal item a ser atendido para uma qualidade boa do ferro-gusa produzido. A Figura 4⁽¹⁾ resume estas situações indesejadas e suas conseqüências.

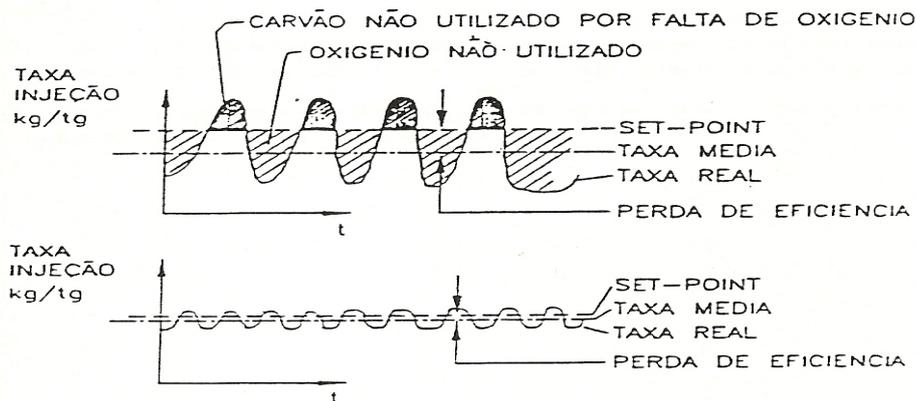


Figura 4. Conseqüências da variabilidade da vazão de carvão pulverizado.

Quando o desvio é positivo e ocorrer a sobra de carvão ele é conduzido para o lavador de gases sem queima efetiva. Quando o desvio é negativo e ocorrer a falta de carvão o oxigênio que sobra é desviado para o gás de alto-forno reduzindo o seu rendimento energético.

Este é o parâmetro a ser buscado na tese de doutorado. As taxas de injeção elevadas de carvão requerem dos sistemas um desempenho específico do sistema visando à precisão, constância e estabilidade das taxas de injeção. Normalmente, os sistemas de automação típicos para controle de vazão de líquidos e gases exigem e possibilitam uma variação instantânea da variável de processo menor ou igual a $\pm 5\%$.

Pode-se notar pela Figura 4 que os critérios de integrais normalmente usados para avaliação do desempenho de malhas de controle não descrevem a variabilidade, pois os somatórios de pequenos erros não representam a instabilidade do processo, pois podem conter grandes variações que se anulam com o passar do tempo.

Por ser a primeira medida a ser realizada antes de muitos planos de ação voltados para a redução da variação da vazão de carvão pulverizado, ela reflete a melhor referência do nível inicial de variação com os atuais. A tese de doutorado se propõe a implantar este sistema de avaliação a curtos e longos prazos através de gráficos de tendência e histogramas probabilísticos registros os resultados da variação instantânea de carvão ao longo de um turno de 8 horas, por exemplo. Isto não foi feito por nenhum pesquisador antes, e não foi encontrado na literatura de controle de processos.

Normalmente poucos sistemas de automação e controle modernos contêm as funções ou blocos de software já incorporados para cálculo da média e desvio padrão. Mesmo no caso do moderno SDCD Centum CS do fabricante Yokogawa do PCI foi necessário desenvolver algoritmos de média acumulativa, pois estes equipamentos são para controle do nível 1 e não são apropriados para modelagem de processos e cálculos matemáticos. Então, os algoritmos desenvolvidos têm que ser úteis e simples para se justificarem.

Os valores instantâneos atuais referentes às variações percentuais das variáveis de processo são então primeiramente calculados em tempo real e desenhados em gráficos de tendência rápidos de curto prazo, ou seja, 3 minutos, e acumulativos com três dias de período, tais como experimentado por Guimarães.⁽⁶⁾

Elaboraram-se gráficos em tempo real, respectivamente para as três estações AF#2, AF#3.1 e AF#3.2, e também para cada um dos seis vasos de injeção, pois existem filosofias e estratégias de controle, bem como malhas de controle que são individuais de cada vaso e coletivas da estação de injeção. Assim, existirão fatores que afetam cada vaso ou cada estação de injeção, composta de dois vasos paralelos gêmeos (simétricos).

A variação percentual de carvão exprime um valor que representa a distância do valor medido (SV) para o valor pedido (PV), conhecido também como desvio (DV): percentual. Seu cálculo é descrito a seguir pela Equação (4):

$$\text{Variação percentual \%} = \text{DV \%} = \frac{SV - PV}{SV} \times 100 \% \quad (4)$$

Onde:

- SV= Valor pedido pelo operador, ou cálculo para a vazão de carvão atual;
- PV= Valor atual da taxa de carvão medida pelo decréscimo do peso do vaso;
- DV= SV-PV = Desvio atual da taxa de injeção;
- o ideal é que o desvio percentual seja sempre zero. Na prática, isso é impossível, pois o controlador necessita que o desvio ocorra para atuar com os algoritmos de controle, PID ou não, para correção da taxa de injeção.

Por exemplo: Seja a taxa de injeção de 30 t/h com um desvio permissível máximo de $\pm 5\%$. Os valores máximos e mínimos aceitáveis operacionalmente para o alto-forno seriam:

- 30 t/h – 5%= 28,5 t/h;
- 30 t/h +5% = 31,5 t/h.

Assim a faixa considerada boa para a variação de injeção seria de $\pm 1,5$ t/h, caso a vazão horária de carvão injetado fosse de 30 t/h.

4 DEFINIÇÕES DAS FAIXAS DE CONTROLE DE QUALIDADE

Com base neste histórico de controle de processo, foram definidas junto com a equipe de operação dos Altos-fornos, três faixas de controle de qualidade para avaliação da variação de injeção pela operação do alto-forno que é o cliente final da injeção de carvão.

Estabeleceu-se como meta inicial pela equipe de operação do alto-forno e de acordo com a literatura de controle de processos, um valor de Ess de $\pm 5\%$. Portanto, uma faixa de variação percentual boa ou aceitável foi definida em $\pm 5\%$ para a taxa de injeção de carvão pulverizado, uma faixa de $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$ como sendo regular e valores acima de $+ 10\%$ ou menores que $- 10\%$ como sendo resultados ruins de controle.

A Tabela 1 a seguir ilustra as faixas definidas pela equipe de operação e controle de processo dos Altos-fornos da CSN.

Tabela 1. Faixas de avaliação da variação de vazão de carvão

Definição da Faixa		Desvio percentual instantâneo
Negativa	Ruim	$DV\% \leq - 10 \%$
	Regular	$- 5 \% \leq DV\% > - 10 \%$
	Boa	$DV\% > - 5 \%$
Positiva	Boa	$DV\% < + 5 \%$
	Regular	$+ 5 \% \geq DV\% < + 10 \%$
	Ruim	$DV\% \geq + 10 \%$

A Figura 5 ilustra o desenvolvimento realizado na tela gráfica 94 do SDCD do PCI da CSN. Foram criados cinco temporizadores distintos para cada faixa do controle de qualidade, o intervalo de computação (fixo em T=21.600 segundos para um turno de 6 horas), os parâmetros dos principais controladores, a média e o desvio padrão do espaço amostral do período anterior.

Os cinco temporizadores do controle de qualidade são acionados e desacionados pela lógica de controle do SDCD quando o desvio percentual entra ou sai fora da faixa das janelas dos valores percentuais (Figura 5). As amostras são efetuadas a cada 60 segundos totalizando um espaço amostral de 480 amostras. No final do espaço amostral, a média e o desvio padrão são calculados e o histograma é armazenado para comparações futuras.

PARAMETROS	VARIACAO PERCENTUAL DE INJECAO [%]	VARIACAO RUIIM < -10 % [S]	VARIACAO REGULAR > -10 % < -5 % [S]	VARIACAO BOA > -5 % < 5 % [S]	VARIACAO REGULAR < 10 % > 5 % [S]	VARIACAO RUIIM > 10 % [S]	INTERVALO DE COMPUTACAO E AMOSTRAGEM
EQUIPAMENTOS VASO 1 AF#2 ABERTURA INICIAL= 69 % P 120 TS 12 I 12 TC 3 → -14.5%		2269	4324	15495	2473	416	TEMPO 28800 24976 Δ T 60 48 Σ X 11456 Σ X ² 316571
VASO 2 AF#2 ABERTURA INICIAL= 70 % P 90 TS 12 I 9 TC 3		9.1%	17.3%	62.0%	9.9%	1.7%	AMOSTRAS 480 MEDIA 28.28 DESVIO 1.7993

Figura 5. Resultados da variação instantânea de carvão para a estação do Alto-forno #2.

5 HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL

A principal ferramenta resultado deste trabalho são os histogramas de distribuição amostral da variação da vazão de injeção de carvão pulverizado para cada uma das três estações montados em tempo real.

Foram designados cinco temporizadores para cada faixa da Tabela 1, correspondendo a uma barra do histograma. Os gráficos são rodados a cada 8 horas conforme ilustra a Figura 6.

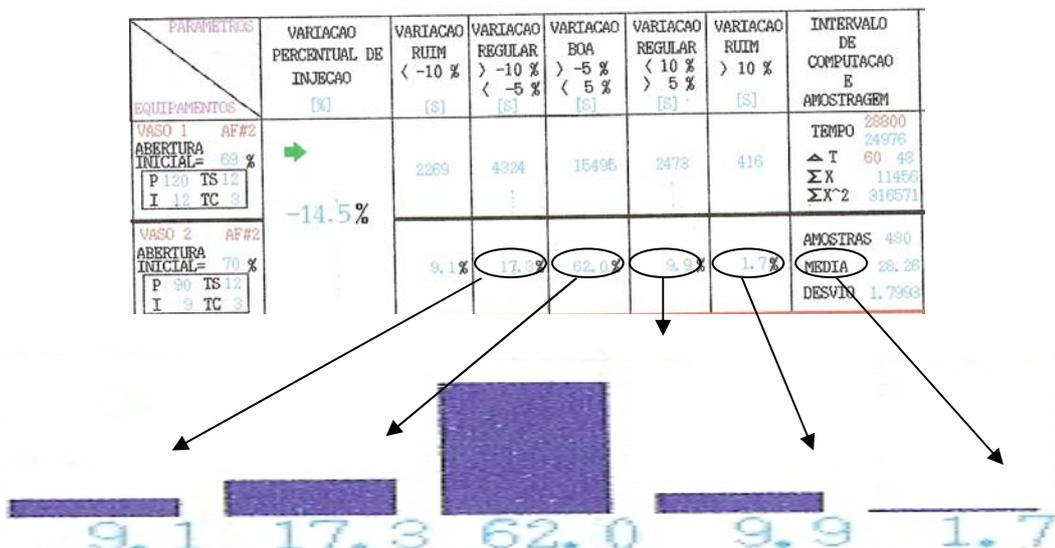


Figura 6. Histograma de distribuição amostral da vazão de carvão.

Cada barra do histograma representa o percentual de tempo em que a variação da vazão de injeção de carvão permaneceu dentro de cada faixa de controle definida pela Tabela 1. No final de oito horas, os histograma resultante composto de cinco barras é armazenado e colocado na FILO, representada na tela gráfica 94. No final do período de amostragem (6 ou 8 horas), os resultados são armazenados numa memória do tipo FILO de cinco barras agrupadas formando o histograma histórico da distribuição amostral. A variação percentual de carvão exprime um valor que representa a distância do valor medido (SV) para o valor pedido (PV), conhecido também como desvio DV percentual. Seu cálculo foi descrito na Equação (4) anterior.

A Figura 7 a seguir ilustra o resultado final da análise *on-line* da variação instantânea da vazão de carvão pulverizado em tempo real para as três estações de injeção em 2004. Observam-se também a memória dos histogramas de três espaços amostrais anteriores para análise do desempenho de mudanças na estratégia de controle.

AVALIACAO DE VARIACAO DE INJECAO

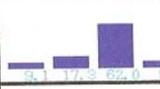
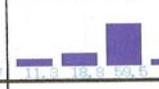
PARAMETROS	VARIACAO PERCENTUAL DE INJECAO	VARIACAO RUIM < -10 %	VARIACAO REGULAR > -10 % < -5 %	VARIACAO BOA > -5 % < 5 %	VARIACAO REGULAR < 10 % > 5 %	VARIACAO RUIM > 10 %	INTERVALO DE COMPUTACAO E AMOSTRAGEM	RESULTADOS ATUAL 3 INTERVALO	RESULTADOS 1 INTERVALO 2 INTERVALO
EQUIPAMENTOS		[S]	[S]	[S]	[S]	[S]			
VASO 1 AF#2 ABERTURA INICIAL= 69 % P 120 TS 12 I 12 TC 3	→ -14.5%	2269	4324	15496	2473	416	TEMPO 28800 24976 Δ T 60 48 Σ X 11456 Σ X ² 316571		
VASO 2 AF#2 ABERTURA INICIAL= 70 % P 90 TS 12 I 9 TC 3		9.1%	17.3%	62.0%	9.9%	1.7%	AMOSTRAS 480 MEDIA 28.26 DESVIO 1.7993		
VASO 1 AF#3 ABERTURA INICIAL= 74 % P 150 TS 12 I 12 TC 3		479	2294	19462	3314	428	TEMPO 28800 24976 Δ T 60 48 Σ X 15725 Σ X ² 596031		
VASO 2 AF#3 ABERTURA INICIAL= 76 % P 120 TS 12 I 12 TC 3	3.4%	1.9%	9.1%	73.9%	13.3%	1.7%	AMOSTRAS 480 MEDIA 35.33 DESVIO 2.7287		
VASO 3 AF#3 ABERTURA INICIAL= 76 % P 120 TS 12 I 12 TC 3		793	3253	17418	3202	311	TEMPO 28800 24976 Δ T 60 48 Σ X 15713 Σ X ² 556296		
VASO 4 AF#3 ABERTURA INICIAL= 74 % P 120 TS 12 I 12 TC 3	-0.4%	3.2%	13.0%	69.7%	12.8%	1.2%	AMOSTRAS 480 MEDIA 35.36 DESVIO 2.7337		

Figura 7. Análise da variabilidade da vazão de carvão pulverizado em tempo real.

6 MALHA DE CONTROLE DE LONGO PRAZO DESENVOLVIDA

O principal desenvolvimento deste trabalho foi a correção do desvio acumulado a longo prazo. Uma vez que o processo de injeção é contínuo, a integral do erro absoluto IAE tem que ser definida durante o período de amostragem, ou seja, periodicamente. Isto é feito para se ter um número que relacione todos os erros do controlador de vazão de injeção ao longo do intervalo de injeção.

A Equação (5) ilustra o novo critério de avaliação e ajuste do controle desenvolvido baseado na IAE e no tempo de amostragem, T, do processo contínuo como no caso PCI ou em bateladas como no caso exemplo da EDG (Estação de Dessulfuração de Gusa em Carro Torpedo) da CSN:

$$IAE = \frac{1}{T} \int_0^T |(SP - PV)| dt [kg / min] \quad (5)$$

O número desenvolvido, IAE periódico na Equação 5 é conhecido como desvio acumulado em longo prazo e é usado para se fazer o ajuste fino dos parâmetros dos controladores de vazão e pressão do vaso de injeção.

O valor do IAE foi calculado no SDCD e inserido no controle do set-point final das estações de injeção de carvão pulverizado. Ele visa corrigir o desvio negativo ou positivo em longo prazo bem como o acompanhamento diário do desempenho das malhas de controle através de sua variabilidade.

Uma malha de controle de ajuste fino do set-point faz parte da tese de doutorado. Ela visa garantir uma correção que ocorre em longo prazo de até +- 800 kg. Neste ponto, ocorrerá um alarme informando ao operador a necessidade de intervenção no processo, reset do alarme ou até diminuição da taxa de injeção.

Em nosso atual nível de desenvolvimento do controle de processo, este item é atendido em sua integridade, sendo que a amplitude deste desvio entre ± 200 kg e ± 800 kg é usada como realimentação no *set-point* de controle da taxa de injeção. Normalmente seu valor situa-se em torno de ± 100 kg.

7 RESULTADOS

Os resultados obtidos são excelentes, pois temos duas estações de injeção do AF#3 que contém equipamentos diferentes com processos similares. A estação AF#3.1 possui média de 35,92 [t/h] e a estação AF#3.2 possui 35,95 [t/h]. O controle da estação de injeção AF#3.2 está melhor que a estação AF#3.1, pois possui um desvio padrão menor. As barras dos histogramas também confirmam este fato.

O controle de correção de set-point a longo prazo proporcionou maior estabilidade térmica e confiabilidade no montante injetado de carvão a longo prazo no alto-fornos da CSN. A estabilidade térmica proporcionada pelo PCI levou a uma maior estabilidade operacional do processo metalúrgico de produção de ferro-gusa.

Quando ocorre um problema de controle do vaso de injeção tais como vazamentos e falhas no sistema hidráulico das válvulas de dosagem de carvão, ou ainda no sistema de transporte pneumático, vazão e pressões de controle, a vazão final de carvão pulverizado na linha principal para o alto-forno é afetada. A faixa boa cai para cerca de 40% a 55% do valor total do tempo amostrado.

Outro desenvolvimento foi a repetir o analisador da tela 94, porém para cada vaso de injeção e não para a estação de injeção. Neste caso, trataram-se cada equipamento individualmente baseado no resultado da análise de injeção para se obter a melhor sintonia e estratégia para cada malha de controle de cada vaso de injeção, resultando numa melhora global do processo da estação de injeção que promove o fluxo contínuo de carvão pulverizado para os altos-fornos.

Este analisador também foi implantado no PCI do Alto-forno 1 da Açominas em Ouro Branco/MG com resultados semelhantes, e se encontra em operação até os dias de hoje tal com o analisador da CSN.

8 CONCLUSÕES

O primeiro passo para qualquer desenvolvimento de controlador dedicado, estratégia de controle nova, ou nova implementação de processo tem que ser o desenvolvimento da ferramenta de análise e diagnóstico da variável de processo principal.

O controle estatístico de processo oferece diversas ferramentas para acompanhamento do desempenho de malhas de controle em geral, principalmente quando há variáveis estocásticas envolvidas no processo. Porém, para cada tipo de aplicação industrial devem-se levar em conta quais são os parâmetros e níveis de desvio padrão a serem atingidos.

Os novos critérios de tolerância para operação do alto-forno conciliam também a capacidade tecnológica e a tolerância dos equipamentos de instrumentação.

A observação do sistema em situação normal forneceu referências e uma interface gráfica com resultados para se diagnosticar facilmente problemas de controle ou em equipamentos do PCI.

REFERENCIAS

- 1 Assis, P.S.; Injeção de Materiais Pulverizados em Altos Fornos / Brasil. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Metais - Outubro de 1993.
- 2 Ishii, K. et alli; Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation. Hokkaido University, Japan. Elsevier Science Ltd. 2000
- 3 Delmeé G. Curso Introdutório às técnicas de controle avançado – 1997.
www.digimat.com.br
- 4 Bishop, Dorf. Performance Indices for Closed-loop Control. Modern Control Systems Pearson/Pretence-hall, 2005
- 5 Torres, B.S., Silva , L.A., Passos L.F., Reis, W., Barroso E.; Avaliação de Desempenho, Diagnóstico e Ajuste de malhas de Controle de Temperatura, Pressão, Vazão e Nível; 5º Congresso Internacional de Automação, Sistema e Instrumentação - ISA Show 2005; São Paulo – SP
- 6 Guimarães J.F.; Redução de Variabilidade, otimização e Controle Avançado de Processos. 6º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação - 2006; São Paulo - SP
- 7 Spiegel, M.; Probabilidade e Estatística - 5ª Edição; Coleção Schaum
- 8 Bussab W.O., Morettin P.A.; Estatística Básica. 4ª Edição - Atual Editora - São Paulo - 1987