

A MEDIÇÃO REAL DA VAZÃO CARVÃO PULVERIZADO¹

Ricardo Sebastião Nadur Motta²
Luíz Edival de Souza³

Resumo

São descritos três métodos de medida de fluxo de carvão neste artigo para o processo de PCI. O projeto original está baseado na variação de peso do vaso de injeção no tempo e um modelo de ARMAX. Um instrumento moderno de vazão de sólidos tipo correlação foi instalado na linha principal do transportador pneumático. Uma integração foi efetuada antes e depois da fase de injeção do vaso. É demonstrado matematicamente e por comparação destes três métodos, que medida de vazão efetuada pelo projeto original é afetada pelo peso do volume de nitrogênio que substitui o mesmo volume de carvão durante a fase de injeção em aproximadamente 2.5%. Então, um quarto método foi projetado para superar este erro contínuo causado pela substituição do volume de carvão pelo volume de nitrogênio. Como resultado, a real medida para a vazão de carvão pulverizado no alto-forno tem que ser corrigida se o método do projeto original é usado.

Palavras-chave: Medição de vazão; Injeção de carvão pulverizado; Alto-forno

THE REAL MEASUREMENT FOR PULVERIZED COAL FLOW

Abstract

Three methods of coal flow measurement are described in this article for the PCI process. The original design is based on vessel weight variation through the time and an ARMAX model. A modern mass solid correlation instrument was installed in the main conveyor pipeline. A batch integration was carried out before and after the coal filling phase of the vessels. It shown mathematically and by comparison of these three methods, that original design measurement for pulverized coal flow is affected by the replacing nitrogen during the injection phase in about 2.5%. Therefore, a fourth method was design to overcome this continuous error caused by the replacement of the coal volume by the nitrogen volume. As a result, the real measurement for pulverized coal flow into the Blast furnace has to be correct if the original design method is used.

Key words: Flow measurement; Pulverised coal injection; Blast furnace.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Student Doctor in Process Control at UNIFEI and Development engineer in CSN – Brazilian National Steel Company – Rod. BR 393 - Lúcio Meira km 5001 - S/N Vila Santa Cecília - Volta Redonda –RJ – Brazil - nadur@csn.com.br;

³ Professor at UNIFEI – Federal Engineering University of Itajubá. Avenida BPS, 1303 – Zip Code: 37500-000 - Itajubá – MG – Brazil edival@unifei.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas automáticos de controle de vazão de sólidos são mais especiais e complexos em relação àqueles controles automáticos para vazão de gases e líquidos. Os sistemas de injeção de carvão pulverizado em Altos-fornos, PCI, estão entre uma das aplicações mais típicas dos sistemas automáticos de controle de vazão de sólidos em sistemas industriais modernos.

O principal item de controle para o processo dos Altos-fornos em relação a Injeção de carvão pulverizado é a estabilidade da vazão de carvão na linha principal de injeção. Quanto mais estável, melhor a queima dos combustíveis e, portanto, maior a eficiência energética. Os sistemas de controle de vazão são geralmente baseados em controladores com algoritmo PID. As medições de vazão de sólidos são obtidas com o auxílio do cálculo da média móvel que obtém a taxa do decréscimo do transmissor de peso do vaso de injeção em intervalos regulares. Este é o estado da arte.

As variações de estoque físico e contábil nos embarques de carvões realizados no período de 2004 a 2008 indicam que o carvão do tipo alto volátil apresentou maior dispersão. O objetivo desse estudo foi a identificação das variações ocorridas entre o estoque físico e contábil dos carvões consumidos na planta de PCI da CSN, Companhia Siderúrgica Nacional e a implantação de ações para eliminar o problema.

Foi realizado um balanço de massa na planta do PCI, onde foi considerado como peso de entrada na planta 1.504,2 t. em base seca e após 27 horas de injeção, o sistema contabilizou apenas 1.399,71 queimadas no Alto-forno 3. O diferencial apresentado foi equivalente a 6,9% em peso. Foram identificados diversos pontos de geração de desvio de massa identificados no estudo, dentre os quais:

A - O carvão mineral bruto que chega ao PCI possui uma umidade variável em função da estação do ano e de sua hicroscopia. Como não se tem um analisador contínuo de umidade do carvão bruto, foi utilizado o valor da umidade do carvão determinado em uma amostra coletada pontualmente. Portanto existe uma diferença entre o valor real e o valor obtido amostra, que não foi considerado no estudo. As moagens de carvão pulverizado além de moer, secar o carvão com teor de umidade final medido oscila em cerca de 0,8% a 1%. Assim, a transformação do peso de entrada e saída de base úmida para a base seca foi considerada fixa. Este erro pode atingir o patamar de até 3%.

B - Na planta do PCI no interior dos moinhos a temperatura atinge níveis superiores a 300°C e durante o processo de moagem existe a ocorrência da perda de massa e que a mesma pode atingir o patamar de 1% a 2%.

As totalizações dessas duas perdas não consideradas no fechamento contábil da CSN atingem o patamar de 4% a 5%, o que ainda não justifica o elevado percentual de perdas do carvão alto volátil quando se compara com os demais tipos de carvões utilizados na planta. A integração da vazão da vazão de carvão do PCI a longo prazo não conferia com a contabilidade da empresa.

2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO POR CÉLULA DE CARGA

O PCI possui estações de injeção de carvão pulverizado com dois vasos trabalhando de modo alternado para garantir o fluxo contínuo de carvão pulverizado para o alto-forno.

A técnica de medição de vazão de carvão pulverizado por célula de carga é uma técnica de medição de vazão de modo indireto, pois não há sensor intrusivo na tubulação de transporte pneumático de carvão pulverizado. O resultado da medição de vazão é obtido por inferência através do ritmo do decréscimo do peso do vaso de injeção no tempo no último minuto.

Os vasos de injeção de carvão pulverizado são apoiados em três células de carga que são ligadas em um conversor de sinal. Não pode haver nenhum tipo de interferência mecânica tipo rigidez de tubulações tal como recomenda.⁽¹⁾ Para tal são usadas juntas de compensação metálicas e de borracha. O resultado é que o vaso de injeção tem seu peso apoiado exclusivamente sobre as três células de carga.⁽¹⁾ A Figura 1 a seguir ilustra o sistema de pesagem:

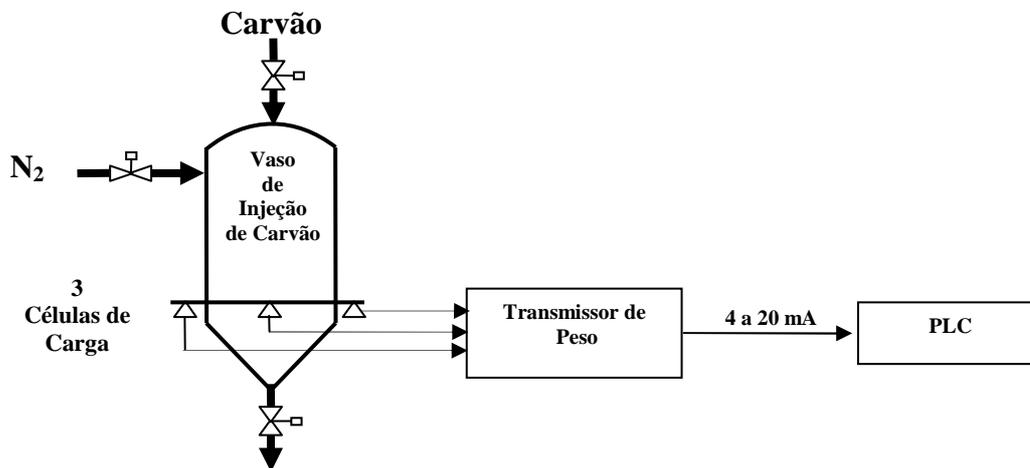


Figura 1 - Sistema de pesagem do vaso de injeção de carvão pulverizado.

Os vasos de injeção possuem um sistema hidráulico especial com os pesos padrão conhecidos apoiados em cilindros hidráulicos para averiguação da calibração periódica do transmissor de peso. A resolução da medida é de ± 5 kg numa escala de 15.000 kg, fornecendo precisão de $\pm 0,03\%$.

A cada 6 segundos um algoritmo computacional subtrai o peso atual, $W(t)$, do vaso de injeção de seu peso há 6 s atrás. De posse deste valor, a taxa de injeção instantânea é calculada, e então colocada numa pilha de 10 dados do tipo FILO, ou seja, o primeiro dado que entra na pilha é o último a sair. A todo instante é calculada uma média destes 10 dados de vazão instantânea conhecida como média móvel, obtendo-se assim o resultado da vazão média no último período de amostragem.

A vazão instantânea de carvão pulverizado horária é calcula em toneladas por hora a cada 6 segundos. A equação (2) ilustra:

$$F(t) = 600 (W(t - 6) - W(t)) \quad (2)$$

Onde:

$W(t)$ é o peso atual do transmissor de peso do vaso de injeção;

$W(t-6)$ é o peso do transmissor há 6 s atrás.

De uma maneira geral, a equação (3) a seguir reproduz o cálculo do algoritmo para obtenção da vazão média no último minuto:

$$V_z(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{F(t - Ti)}{N} \quad (3)$$

Onde:

N é o número de amostras da média móvel (N=10);

T é o período de aquisição ou intervalo de tempo entre as amostras (T= 6 seg.);

A vazão de carvão, V_z , pode-ser obtida então por um modelo ARMAX^(2,3) cuja variável exógena $u(k)$ é dw/dt e sem ruído $e(k)$ adicionado à saída, tal como ilustra a equação (4):

$$Y(k) = \frac{u(k) + u(k - 1) + u(k - 2) + \dots + u(k - 10)}{10} \quad (4)$$

3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE SÓLIDOS

Os instrumentos de fluxo para medição de sólidos granulados nas tubulações pneumáticas podem ser caracterizados como restritivos ou não-restritivos, tal como descreve.⁽¹⁾

Os sensores de vazão restritiva que têm como base uma chapa de orifício, um tubo Venturi, um tubo Coriolis, uma chapa de impacto ou uma turbina, sofrem problemas de desgaste devido à natureza abrasiva de partículas de movimentos rápidos e desvio e contração das linhas de fluxo.

O sensor implantado utiliza somente as técnicas que sejam não-restritivas na natureza para não provocar perda de carga na tubulação principal de transporte de carvão. As diversas tecnologias restritivas incluindo os métodos mecânicos e termodinâmicos foram descartadas de aplicação.

Conforme medição de um fluxo de gás ou líquido de fase simples, metodologias de medição da taxa de fluxo dos sólidos em uma tubulação pneumática podem ser divididas em duas categorias: direta e de inferência.

Um medidor de fluxo direto de sólidos tem um elemento de sensoriamento que responde diretamente à taxa de massa dos sólidos que passa através do instrumento.

Um medidor de fluxo de inferência dos sólidos mede a concentração volumétrica instantânea e a velocidade instantânea dos sólidos sobre o corte transversal da tubulação em que o mesmo está instalado⁽⁴⁾ e como recomenda.⁽⁵⁾ Assim, a taxa de vazão mássica dos sólidos pode ser obtida com a seguinte equação (1):

$$M_s(t) = \rho_s A V_s(t) \beta_s(t) \quad (1)$$

Onde:

$\beta_s(t)$ = concentração volumétrica proporcionalmente transversal e instantânea;

$V_s(t)$ = velocidade dos sólidos na tubulação principal;

ρ_s = densidade real do material dos sólidos;

A = área de corte transversal da tubulação.

As medições de $V_s(t)$ e $\beta_s(t)$ podem envolver tanto a mesma ou duas técnicas de sensoriamento diferentes. O conhecimento da velocidade dos sólidos e da concentração volumétrica numa tubulação pneumática é mais valioso para os operadores do processo do que somente a vazão mássica. De fato, a vazão mássica dos sólidos pode prover os usuários com três parâmetros: a velocidade, a concentração e taxa da vazão mássica dos sólidos.

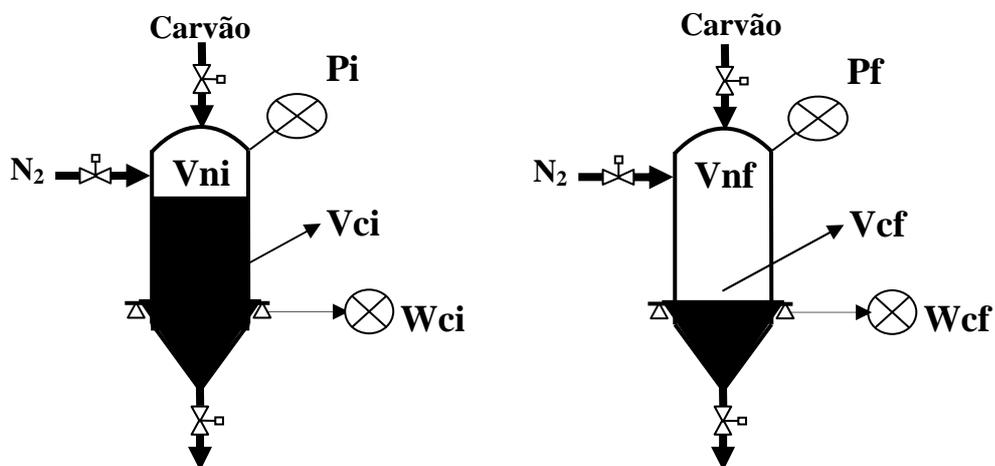
O sensor Densflow do fabricante SWR⁽⁶⁾ é um instrumento não-restritivo e de inferência especialmente projetada para a linha de injeção principal do PCI da CSN. Existem outros fabricantes tais como Granucor⁽⁷⁾

Além disto, ele possui uma função de software única solicitada sob encomenda que será útil na análise dos problemas de medição de vazão. Sua característica especial única é a função extra de calibração externa vinda do sistema de pesagem.

Assim, $M_s(t) = V_z(t)$ quando o sistema está estável o medidor aceita uma calibração externa. O sinal de vazão do Densflow é calibrado seguido uma rotina. A integração do sinal de vazão do Densflow é usada para obtenção do fator de calibração que dependerá da densidade do carvão. Este valor pode ser obtido utilizando a equação 1.

4 O ERRO DA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE CARVÃO DOS VASOS DE INJEÇÃO

As Figuras 2a e 2b seguir descrevem a medição do peso do vaso de injeção carvão e as variáveis de processo principais durante o início da fase de pressurização, início e final da fase de injeção dos vasos:



V =Volume do vaso de injeção = $25m^3$; Vni =Volume inicial de nitrogênio; Wci =peso inicial do carvão no vaso de injeção aliviado: $Pi= 0$ Bar; Wci =peso inicial do vaso de injeção (carvão + N_2) =12,5 t; Vnf =Volume final de nitrogênio; Wcf = Peso final de carvão não injetado ou remanescente=2 t; Wcf = Peso final de carvão no vaso de injeção aliviado: $Pi= 0$ Bar; Pi = Pressão de injeção inicial do vaso=11 Bar; Pf =Pressão final = constante durante a fase de injeção=11 Bar; W = medição de peso em tempo real do vaso de injeção.

Figura 2. a - Início da fase de Injeção; b - Final da fase de Injeção.

Como visto no item 2, a vazão de carvão é calculada através de um modelo ARMAX de retroação, ou média móvel de 10 amostras da diferença dos pesos medidos a cada 6 segundos pela balança $W(t)$, tal como (5):

$$V_z(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (5)$$

1º Fato:

Dentro os fatos observados nas Figuras 2a e 2b, pode-se notar que durante a fase de injeção ocorre esvaziamento do carvão que é preenchido automaticamente pelo controlador PID de pressão de nitrogênio constante. Portanto, para condições iniciais, assume-se que $P_i = P_f = \text{constante}$ durante toda a fase de injeção = 11 Bar.

O volume de nitrogênio inserido durante a fase de injeção para preservar a pressão do vaso constante substitui o volume de carvão pulverizado que possui densidade aproximada de 610 kg/m^3 . Este nitrogênio possui um peso tal que é acrescido indevidamente na derivada principal do cálculo da vazão de carvão na linha.

Diz-se indevidamente, pois esta é a fonte de erro entre a quantidade real injetada a longo prazo no PCI. Portanto, o sistema de pesagem leva em consideração o peso de nitrogênio inserido durante a fase de injeção para manter a pressão do vaso de injeção constante como se fosse carvão injetado para o Alto-forno. A balança de pesagem do vaso de injeção, $W(t)$ ou simplesmente W , não leva em conta o volume de nitrogênio inserido durante a fase de injeção para manter a pressão constante como se fosse carvão injetado, tal como demonstra (6) a seguir:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_C}{dt} - \frac{dW_N}{dt} \quad (6)$$

A equação diferencial anterior nos diz que enquanto o peso de carvão diminui com o tempo, o peso de nitrogênio inserido para compensar o volume de carvão injetado, aumenta com o passar do tempo.

Porém, este peso do vaso de injeção decrescendo no tempo durante a fase de injeção leva em conta todo o peso do vaso de injeção (W). Assim o volume do carvão que é injetado para o Alto-forno é substituído gradualmente durante a fase de injeção por um volume de nitrogênio correspondente na mesma CNTP. Deve-se levar em conta que o carvão não é compressível e o nitrogênio é um, fluido compressível.

Portanto, a vazão medida e controlada pelo sistema não corresponde não somente ao peso de carvão decrescendo no tempo (W_C) como também o peso de nitrogênio correspondente (W_N), ao volume de nitrogênio que substitui o volume de carvão injetado. Isto não foi considerado na análise de Birk, Johansson e Medvedev.⁽⁵⁾

2º Fato:

O peso de carvão dentro do vaso (excluindo o peso de N_2) no fim da injeção é praticamente igual ao peso de carvão após sua fase de alívio. Isto pode ser comprovado pressurizando-se o vaso e em seguida aliviando-o e assim efetuando a comparação entre os pesos antes e após a pressurização. Sejam:

W_{cf} = Peso final de carvão não injetado ou remanescente = 2 t;

W_{cf_0} = Peso final de carvão no vaso de injeção aliviado: $P_i = 0 \text{ Bar}$;

Portanto, $W_{cf} \approx W_{cf_0}$.

A conclusão é que o arraste de carvão pela válvula de alívio durante a depressurização é desprezível. Isto é importante para saber que o carvão que entra no vaso durante a fase de carregamento não é recirculados de volta para o silo de finos através da válvula de alívio. Esta observação terminou com um mito/paradigma que simplifica a busca pelo balanço de massa do PCI. Ela também é descrita em⁽⁵⁾.

3º Fato:

O carregamento do vaso oposto afeta a balança do vaso que está injetando em + 50 kg, ou seja, o peso do vaso que está injetando sobre + 50 kg devido ao carregamento do vaso oposto (W_{co}). A equação (6) torna-se (7)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_C}{dt} - \frac{dW_N}{dt} - \frac{dW_{CO}}{dt} \quad (7)$$

Levando-se estes três fatos em consideração, bem como os valores típicos de processo ilustrados pelas figuras 4a e 4b, pode-se obter um erro percentual típico para $Vz(t) = 30$ t/h ($P_i = 11$ Barg) durante a fase de injeção:

W_{ci} = peso inicial de carvão com o vaso despressurizado = 12,5 t;

V_{ci} = volume inicial de carvão = $12,5/0,61 \approx 20,5$ m³;

V_{ni} = volume restante para preencher com $N_2 = 25 - 20,5 = 4,5$ m³

No início da injeção, o vaso possui 4,5 m³ vago para ser pressurizado com nitrogênio pressurizado a 11 Barg. No final da fase de injeção, o volume final de carvão será:

V_{cf} = volume final de carvão = $2/0,61 \approx 3,28$ m³;

V_{nf} = Volume final de nitrogênio = $25 - 3,28 = 21,72$ m³;

O volume de N_2 inserido ao longo da fase de injeção pelo controlador de pressão constante do vaso corresponde a uma diferença $V_{ni} - V_{nf} = 17,22$ m³. Este nitrogênio provém dos compressores e possui uma temperatura média de 20 °C. Quando entra em contato com o carvão no vaso, sua temperatura se eleva para próxima a do carvão, visto que a quantidade de energia térmica armazenada no carvão é muito maior que no nitrogênio. O volume pressurizado a 12 Barabs e 40 °C possui um volume normalizado de 180 Nm³. Como a densidade do N_2 é de 1,2527 kg/Nm³, este volume normalizado possui um peso aproximado de 225 kg por fase de injeção. Sabendo que o peso real de carvão foi de 10,5 t, o erro percentual aproximado previsto a mais a ser encontrado é:

$$\text{Erro1 \%} = (10,5 - 0,225) / 10,5 \approx 2,15\%$$

Somando-se + 50 kg introduzido pela pesagem do vaso oposto, caso de fato esta interferência exista, tem-se aproximadamente 275 kg de acréscimo de peso durante a fase de injeção.

$$\text{Erro2 \%} = (10,5 - 0,275) / 10,5 \approx 2,61\%$$

Pode-se dizer em vista dos resultados acima que o erro médio esperado da integração da vazão calculada pelo sistema, $Vz(t)$ é da ordem de 2,38%.

O volume de nitrogênio que substitui o volume de carvão injetado possui nas CNTP um volume tal que dividido pela densidade do nitrogênio fornece um peso (W_N) aproximado de 250 kg a 350 kg em cada fase de injeção. Para integrações de longo prazo isto corresponde inicialmente cerca de 2% a 3% de erro, dependendo da pressão de injeção. Na média geral, pode-se adotar 2,5%.

5 SOLUÇÕES ADOTADAS PARA A INTEGRAÇÃO DO CARVÃO INJETADO NO ALTO-FORNO

Foram adotadas três soluções para se obter a real integração do carvão injetado nos Alto-fornos através das três estações de injeção do PCI. As integrações

são realizadas pelo SDCD do fabricante Yokogawa usado no controle do PCI, a cada 6 horas em todas as três estações de injeção.

O reset de integração ocorre durante a troca de turno e os valores integrados são armazenados numa memória do tipo FILO contendo o último dia (4 integrações de 6 horas cada):

- **Integração de Vz(t) Estações de Injeção**

Ela contém o erro devido à malha de pressão constante do vaso de injeção e a conseqüente contabilização do peso de N₂ como se fosse peso de carvão. As vazões das três estações de injeção são integradas tal como Q₁:

$$Q_1 = \int_0^{6h} Vz(t) dt$$

- **Integração de Ms(t) do Densflow produz:**

O sinal de vazão do Densflow não sofre influência do nitrogênio de manutenção da pressão de injeção ou até problemas de grandes vazamentos nas válvulas de alívio ou prato. Ele também não sofre interferência mecânica de nenhum tipo, tal como a pesagem do vaso oposto, desequilíbrio das células de carga ou vaso enrijecido (junta de expansão defeituosa).

$$Q_2 = \int_0^{6h} Ms(t) dt$$

Sua integração proporcionará mais um valor para comparação com a integração com o vaso despressurizado. Esta integração também pode ser usada para se determinar as variações da densidade do carvão através do fator de calibração que é obtido a toda calibração automática, conforme visto no item 4 anterior. Em nosso sistema, instalamos somente nas duas estações de injeção do Alto-forno 3 da CSN.

No sistema de injeção de carvão pulverizado do fabricante Paul Wurth, o fluxo de carvão global é controlado por uma única malha de controle fechada, composta por uma válvula dosadora (Grisko: válvula de controle especialmente desenvolvida pela Paul Wurth) e um medidor de vazão mássica de carvão do tipo correlação cruzada. Densflow⁽⁶⁾ ou Granucor.⁽⁷⁾

- **Algoritmo de Integração com o vaso despressurizado:**

Para a obtenção da vazão real de carvão injetado, Q₃, é necessário eliminar a interferência do nitrogênio e do carregamento do vaso oposto. Assim, a equação (8) expressa o real valor de carvão injetado acumulado para o alto-forno injetado pela estação de injeção:

$$Q_3 = \int_0^{6h} \left(\frac{dW_C}{dt} - \frac{dW_N}{dt} - \frac{dW_{CO}}{dt} \right) dt \quad (8)$$

Em (8), se $\frac{dW_N}{dt} = 0$ e $\frac{dW_{CO}}{dt} = 0$, Q₃ tornar-se-ia o valor real de carvão

procurado que não possui os 2,38% de erro a mais na quantidade injetada. Na realidade, o sistema está injetando menos 2,38% do que as integrações atuais de $Vz(t)$ da tela gráfica 86 do SDCD do PCI da CSN nos mostram.

Para eliminação da interferência do nitrogênio e do carregamento do vaso oposto no sistema de pesagem, e para maior precisão da quantidade acumulado a de carvão injetado, tem-se o seguinte algoritmo de 10 passos:

- 1 - A cada 6 horas, zera o integrador: $Q_3\text{inicial}=0$.
- 2 - Fechou alívio 1 => coleta o peso do vaso 1 após carregamento = Wci_0 ;
- 3 - Abriu alívio 1 => coleta o peso do vaso 1 após a fase de alívio = Wcf_0 ;
- 4 - Realizada a diferença entre os pesos injetados = $\Delta W1 = Wci_0 - Wcf_0$;
- 5 - Fechou alívio 2 => coleta o peso do vaso 2 após carregamento = Wci_0 ;
- 6 - Abriu alívio 1 => coleta o peso do vaso 1 após a fase de alívio = Wcf_0 ;
- 7 - Realizada a diferença entre os pesos injetados = $\Delta W2 = Wci_0 - Wcf_0$;
- 8 - Faz $Q_3=Q_3\text{inicial}+ \Delta W1+ \Delta W2$ e zera $\Delta W1$ e $\Delta W2$;
- 9 - No final de 6 horas faz a FILO entre $Q_3(t-18)$, $Q_3(t-12)$, $Q_3(t-6)$ e $Q_3(t)$.

A principal desvantagem do algoritmo é que não pode ser usado para controle em tempo real, visto que o resultado da integração é obtido por bateladas, isto é, somente no final da fase de injeção de cada vaso o valor integrado é novamente calculado.

6 RESULTADOS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E DAS INTEGRAÇÕES REALIZADAS

Foram efetuados cálculos de integração no SDCD para comparar as integrações de Q_3 com Q_1 e Q_2 em cerca de uma hora, ou seja, com apenas três carregamentos de vaso. Com isto, pode-se medir e descobrir de quanto é o erro percentual que tem sido informado a produção da empresa. Através da comparação pode-se deduzir que erro percentual calculado é próximo ao erro percentual medido comprovando o que acontece com as variáveis físicas e de processo do vaso de injeção durante a fase de injeção.

As estações de injeção do Alto-forno 3 são complementares alimentando as lanças ímpares (Estação AF#3.1) e as lanças pares (Estação AF#3.2) na mesma quantidade. Trata-se de duas estações de injeção simétricas e similares que somadas proporcionam a vazão total de carvão pulverizado para o Alto-forno 3. É uma excelente base de comparação, haja vista que mesmo similares os equipamentos das estações são distintos, e os valores integrados a longo prazo tem diferenças menores que 0,1 %, tal como ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado comparativo das integrações realizadas

Medição	Integração	\int	Estação AF#2	Estação AF#3.1	Estação AF#3.2
Células de carga	$Vz(t)$	Q_1	32,53	32,51	32,55
Densflow	$Ms(t)$	Q_2	31,72	31,70	31,75
Algoritmo	$Q_3= \Delta W1+ \Delta W2$	Q_3	31,6	31,7	31,9

Foram efetuadas outras integrações dos três tipos periódicas realizadas a cada 6 horas para cada estação de injeção. Elas são armazenadas em memórias correspondentes aos últimos 4 turnos e mostrados na tela gráfica da estação de operação.

A Tabela 2 ilustra um quadro comparativo entre as técnicas de medição de vazão de carvão abordadas neste artigo.

Tabela 2 - Quadro comparativo: técnicas de medição de vazão de carvão

Medição	Vantagens	Desvantagens
Células de carga: Vz(t)	-O sistema de pesagem já é incorporado na instrumentação básica da planta; -Sistema convencional e de uso consagrado;	_Sofre interferência da malha de controle de pressão constante do vaso, vazamentos nas válvulas prato e alívio e carregamento do vaso oposto; -Demanda filtro de software para correção e formulação do modelo ARMAX; -Precisa de calibração com pesos padrões;
Densflow: Ms(t)	- Não sofre interferência da pressão, vazamentos, processo e mecânica. - Pode ser usado no controle da vazão de carvão principalmente quando há reposição de nitrogênio pela pressurização rápida em caso de vazamentos;	-Necessita de um segundo instrumento para calibração; -Sofre ligeira mudança em função da densidade da mistura de carvão pulverizado;
Algoritmo: ΔW	-Alta precisão para quantidade de carvão injetado a longo prazo; -Permite contabilizar o que foi considerado erroneamente como carvão devido perdido com o acréscimo de nitrogênio.	-Não é calculado em tempo real e, portanto não pode ser usado no controle dinâmico da vazão de carvão da válvula dosadora;

8 CONCLUSÕES

Este artigo tenta juntar e mostrar uma extensa seleção de técnicas de medição irrestrita aplicável às vazões de sólidos em tubulações de transporte pneumáticas e para revisar nosso estado de conhecimento no despertar de mais de 20 anos de desenvolvimento. O autor está ciente de que há invenções e publicações que não têm sido incluídas por vários motivos, dentre as quais destaca-se o Densflow⁽⁶⁾ que foi desenvolvido em 2005.

O instrumento permite obter além da vazão mássica de sólidos a velocidade e a densidade do produto que está sendo transportado pneumáticamente. Isto proporciona variáveis de controle em tempo real para o transporte pneumático, visando conseguir uma maior eficiência energética, ou seja, transportando a mesma quantidade de carvão com menos gás de transporte (nitrogênio) economizando energia elétrica dos compressores.

Os processos de Alto-forno e Termoelétrica a Carvão por questões energéticas e ambientais agora requerem desvios da vazão mássica de sólidos da ordem de 2,5% do valor de *set-point*. Esse requisito pode somente ser correspondido por uma medição on-line contínua, confiável e subsequente malha de controle fechada das vazões de sólidos em tubulações pneumáticas.

Os valores integrados comprovam a existência da contabilização incorreta da umidade e do peso de nitrogênio como se fosse carvão injetado, o que na verdade não é uma perda e sim uma contabilização incorreta.

As estimativas para as hipóteses de percentual de erro final das três causas do PCI, são exibidas a seguir:

- 1% a 2% de perda de massa por volatilização do carvão;
- 3% a 4% umidade que sai pela chaminé além do certificado; e
- 2,5% perda por reposição de nitrogênio de injeção.

Portanto, o somatório da estimativa do percentual de erro no balanço de massa do carvão na planta PCI, então vai de 6,5% a 8,5%. Esta estimativa de erro confere com o resultado de 6,9 % obtido pelo teste de 2004. Estas são as causas principais do não fechamento do balanço de massa do carvão mineral.

Referencias

- 1 Lipák, Bela G. – Instrument Engineers´ Handbook. Third Edition 1995 – Cap. 2.4 – page 93 and Cap. 7.22 - page 808; Process Measurement and Analysis.
- 2 Agrirre, L.A. Introdução a Identificação e Sistemas: Técnicas Lineares e não-lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Editora UFMG - 3ª Edição – 2007.
- 3 Souza, A.C.Z., Pinheiro, C.A.M., - Introdução à Modelagem, Análise e Simulação de Sistemas Dinâmicos - Editora Interciência - 2008.
- 4 Yong Yan; Mass flow measurement of bulk solid in pneumatic pipelines. School of Science and Technology, Teesside University, Middleborough, Cleveland, TS1 3BA, UK, publishing em 16 de September de 1996.
- 5 Birk, W., Johansson, A., Medvedev, A.; Model-Based control for a fine coal injection plant. IEEE Control System Magazine, 19(1),33-43 , February 1999;International conference on control applications (pp 127-132).
- 6 Densflow. Manuals by SWR engineering Messtechnik GmbH. www.swr-engineering.com, info@swr-engineering.com
- 7 Granucor. Manuals by Thermo Ramsey Company; www.thermoramsey.com,