

MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO DA ESTAÇÃO DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO DA CSN¹

Ricardo Sebastião Nadur Motta²
Luíz Edival de Souza³
Priscylla Angélica da Silva Oliveira⁴

Resumo

Este trabalho modela o transporte pneumático das estações de injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos da CSN. Esta modelagem é útil para se determinar os valores estáticos de pressão de injeção, vazão de nitrogênio de transporte e fluidização do cone base do vaso de injeção. Através deste modelo, as vazões do fluxo bifásico de carvão pulverizado e nitrogênio no processo são determinadas e como resultado, uma posição inicial predeterminada na fase de injeção para a válvula de controle de fluxo de carvão é obtida, e inserida em seu controle dinâmico. As medições dos parâmetros do transporte pneumático como densidade e velocidade foram realizadas com ajuda de um medidor de sólidos instalado na linha principal e seus resultados usados para as validações do modelo do transporte pneumático. Os valores obtidos comprovam o acerto da modelagem e contribuem para eficiência e melhoria do processo de transporte de carvão pulverizado em fase densa com o menor uso possível de gás de transporte.

Palavras-chave: Alto-forno; Injeção de carvão; Transporte pneumático.

PNEUMATICALLY CONVEYOR MODELING OF CSN'S PULVERIZED COAL INJECTION STATIONS

Abstract

This work models the pneumatic transport of the pulverized coal injection stations into CSN's Blast Furnaces. The model is useful to determine the static values of injection pressure, conveyor nitrogen and fluidization flow at the bottom of the injection vessel. Through this model, the two-phase flow of pulverized coal and nitrogen in the process are certain and as result an initial position predetermined in the injection phase for the coal flow dosing valve is inserted in the dynamic control. The pneumatic conveyor parameters such as density and speed were accomplished with help of a modern solid meter installed in the main coal pipeline and its results are used for the validations for the pneumatic conveyor model. The obtained values check the success of the model and they contribute to efficiency and improvement of the pulverized coal conveyor process in dense phase with the smallest possible use of transport gas.

Key words: Blast furnace; Col injection; Pneumatic conveyor.

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 *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.*

⁴ *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.⁽¹⁾

O sistema de injeção de carvão pulverizado, PCI, da CSN foi fornecido e comissionado pela empresa Alemã Claudius Peters® em 1997 que forneceu toda a engenharia básica para o controle de todos os processos. O PCI da CSN possui três estações de injeção com capacidade nominal de injeção de 50 t/h cada, sendo uma para o AF#2 e duas estações para o AF#3.

A estação de injeção é composta basicamente de dois vasos de pressão gêmeos com base cônica trabalhando em ciclos alternados. Enquanto um dos vasos está injetando carvão para o alto-forno com o auxílio do transporte pneumático, o outro vaso está se preparando para a injeção. Durante a preparação, ocorrem as fases de alívio da pressão de injeção, carregamento de carvão pulverizado até 12,5 t, espera despressurizada, pré-pressurização com nitrogênio de pressão baixa, e fase de pressurização rápida com nitrogênio de pressão alta até atingir a pressão de injeção.

Assim quando o vaso que está em fase de injeção atingir um peso mínimo de duas t, o vaso complementar que estava aguardando pressurizado assume a fase de injeção de modo a garantir a continuidade da vazão de carvão. A Figura 1 ilustra em maiores detalhes o projeto original da injeção de carvão pulverizado da CSN em 1997.

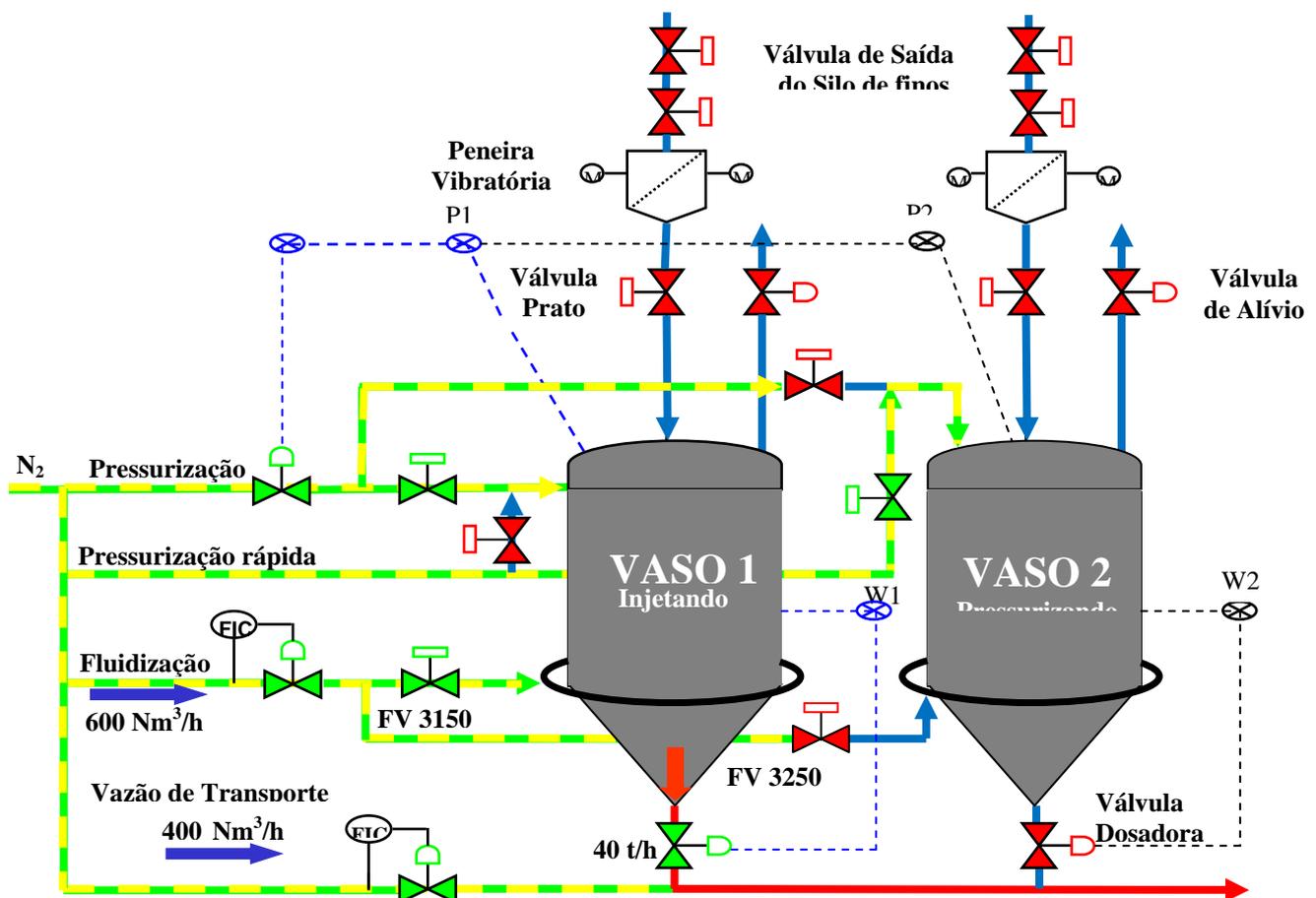


Figura 1. Detalhes da estação de injeção de carvão pulverizado.

A estação de injeção do PCI da CSN em comparação com a estação de injeção do PCI da SSAB em Luleo/Suécia descrito em Birk, Johansson e Medvedev⁽²⁾ possui diversas inovações e melhorias de processo. Dentre as mais radicais, destaca-se a introdução da linha de vazão de fluidização para o cone do vaso de injeção localizado em sua base. Estes desenvolvimentos foram introduzidos pela Claudius Peters ao longo da implantação de vários PCI ao redor do Mundo.

Desde então, nenhuma pesquisa foi refeita visando elaboração de um novo modelo. Portanto, os vasos de injeção do PCI da CSN têm que ser novamente modelados para se obter valores e parâmetros que levam a um melhor desempenho.

Uma vez efetuado o modelo matemático que descreve o comportamento da estação de injeção poderá se efetuar a análise do comportamento das quatro malhas de controle durante a fase de Injeção. A partir disto, pode-se avaliar o grau de acoplamento e interação entre as malhas de controles principais. Com isto, pode-se projetar uma nova estratégia de controle que leve em consideração o desacoplamento entre as malhas de controle de vazão e pressão.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- determinar a velocidade das partículas de carvão na tubulação de transporte pneumático;
- obter o perfil de pressão ao longo de toda a linha de transporte pneumático; e
- calcular a relação sólido/gás e a densidade de fluxo bifásico usada;

Com bases nestes resultados, é possível colocar o sistema de injeção de carvão pulverizado numa faixa operacional ótima sem risco e entupimento da linha principal ou das lanças de injeção. Com isto, pode aumentar a relação sólido/gás sem risco de entupimento para as lanças de injeção obtende- a uma maior eficiência energética do sistema de injeção do PCI.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais (equipamentos, programas etc.) utilizados foram o SDCD da Yokogawa com sua programação dedicada e os procedimentos necessários ao desenvolvimento proposto foram a pesquisa e cálculos realizados em tempo real no controlador de processos.

O PCI da CSN é uma planta totalmente automatizada por um SDCD de última geração do fabricante Yokogawa, modelo Centum CS. Este equipamento possui diversos tipos diferentes de algoritmos PID de última geração além da versatilidade de programação e ferramentas avançadas de controle de processo tais como *Feedforward* e Lógica *Fuzzy*.⁽³⁾

Os métodos de validação dos modelos foram diversas ferramentas de software em tempo real desenvolvidos para análise e coleta de dados estatísticos e históricos para comparação e análise das novas estratégias e lógica de controle que não serão comentadas neste artigo. Após a consagração das novas estratégias de controle lógico do processo, outros tipos de controle tais como MIMO, PID, LQG, *Feedforward*, etc. são analisados em outros trabalhos da tese do autor.

4 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os vasos de injeção de carvão pulverizado podem ser modelados como se fossem tanques pressurizados e o princípio da conservação da massa pode ser usado. Porém,

nem o vaso, nem as quatro válvulas de controle têm um comportamento linear de fácil modelagem. O vaso que se encontra na fase de injeção recebe vazão de nitrogênio pela linha de controle de pressão e pela linha de controle de vazão do anel de fluidização.

Além disto, ele possui um peso de carvão inicial ganho na fase de carregamento e um volume de nitrogênio inicial ganho nas fases de pré-pressurização e pressurização rápida que serão negligenciados nesta modelagem devido ao interesse da modelagem somente para a fase de injeção.

O novo modelo (Figura 2) leva em consideração as novas fases de espera despressurizada e pré-pressurização dos ciclos da injeção que foram implementadas pela CSN. Além disto, as próprias melhorias da Claudius Peters mudaram o processo do vaso de injeção significativamente com o passar dos anos ao longo de várias plantas de PCI ao redor do Mundo desde 1997.

Isto pede que sejam considerados no modelo diversas variáveis novas, tais como o controle de vazão de fluidização do cone base do vaso de injeção, controle do set-point de pressão de injeção, e finalmente o controle do *set-point* de injeção com implementações da CSN. Em complementação, foram adicionadas outras variáveis disponíveis do sistema de injeção, tal como:

- velocidade, densidade de carvão e Perda de carga na linha principal;
- temperatura do carvão e do Nitrogênio da rede de alimentação;
- vazões de fluidização, transporte e pressão de injeção; e
- curva característica da válvula dosadora, Densidade de carvão e nitrogênio.

As condições de contorno da modelagem e as variáveis descritas anteriormente não foram consideradas no modelo de Birk, Johansson e Medvedev.⁽²⁾ Além disto, não houve considerações sobre a vazão de transporte e sua influência na pressão diferencial do injetor. Tudo isso torna necessário o desenvolvimento de um novo modelo para descrever o comportamento do vaso de injeção e poder inferir e deduzir os melhores algoritmos e estratégias de controle.

A Figura 2 ilustra o desenho esquemático novo do vaso de injeção atual da CSN, objeto de modelagem deste trabalho. A modelagem é feita durante a fase de injeção levando-se em consideração a queda de pressão da linha principal de injeção de 4" devido ao carvão e ao nitrogênio desde a saída do vaso até a lança de injeção de carvão. As perdas no distribuidor, D, são consideradas como se fosse mais uma curva de 90° no trajeto da linha principal.

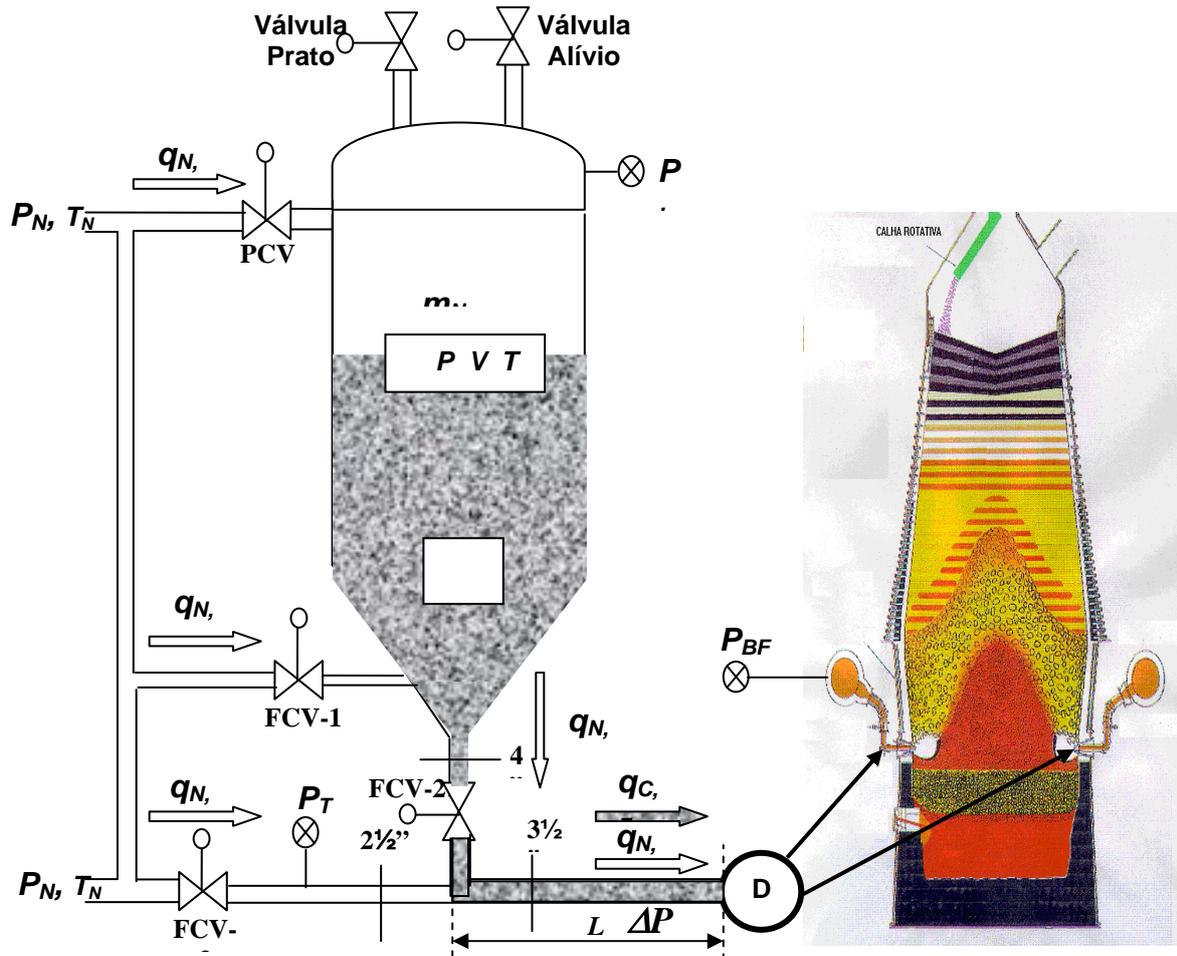


Figura 2. Desenho esquemático do novo modelo do vaso de injeção.

A Tabela 1 contém a nomenclatura usada na modelagem. Procurou-se preservar a mesma nomenclatura usada por Birk, Johansson e Medvedev,⁽²⁾ acrescentando as novas variáveis obtidas com o desenvolvimento da modelagem e inclusão das vazões de transporte e fluidização. Além disto, houve o levantamento das curvas características das válvulas de controle, e da inclusão das variáveis e parâmetros do transporte pneumático.

Tabela 1. Nomenclatura da modelagem do vaso na fase de injeção

Símbolo	Descrição	Detalhes
A	Área da restrição do Venturi	Área transversal mínima interna da válvula
L	Comprimento da linha principal de 4"	Comprimento desde o vaso até o alto-forno
M	Massa total dentro do vaso	Massa de carvão + Massa de Nitrogênio
m_C	Massa de carvão dentro do vaso	Peso de carvão carregado no vaso
m_N	Massa de N_2 dentro do vaso	Peso de nitrogênio dentro do vaso
P_I	Pressão interna do vaso de injeção	"Set-point" em função da vazão de carvão
P_T	Pressão da linha principal de injeção	Pressão do transporte pneumático
P_N	Pressão de alimentação	Pressão da rede de nitrogênio = 17 Barg
ΔP_L	Queda de pressão na linha principal	Perda de pressão durante a fase de injeção
P_D	Pressão na linha antes do Distribuidor	Pressão do distribuidor de carvão
P_{BF}	Pressão de sopro da base do Alto-forno	Pressão do Alto-forno #3 da CSN= 4,2 Barg
$F_{N,P}$	Vazão de N_2 através da PCV	Vazão volumétrica pela linha de pressão
$F_{N,F1}$	Vazão de N_2 através da FCV1	Vazão de N_2 fluidização no cone do vaso
$F_{N,F2}$	Vazão de N_2 através da FCV2	Vazão de N_2 pela válvula dosadora
ΔP_{FCV2}	Perda de carga através da FCV2	Queda de pressão da Válvula Dosadora
$F_{N,F3}$	Vazão de N_2 através da FCV3	Vazão de N_2 de transporte no tubo injetor
$q_{N,P}$	Vazão mássica de N_2 através da PCV	Volume inserido pelo controle de pressão
$q_{N,F1}$	Vazão mássica de N_2 através da FCV1	Volume inserido pela linha de fluidização
$q_{N,F2}$	Vazão mássica de N_2 através da FCV2	Volume que passa pela dosadora
$q_{N,F3}$	Vazão mássica de N_2 através da FCV3	Volume inserido no tubo injetor
$q_{N,L}$	Vazão mássica N_2 pela linha principal	Vazão transporte + vazão de N_2 Dosadora
$q_{C,F}$	Vazão mássica de Carvão pela FCV2	Taxa de injeção de carvão no Alto-forno
μ	Relação de kgCarvão/kg N_2	Parâmetro do transporte pneumático
V	Velocidade das partículas de carvão	Parâmetro do transporte pneumático
ρ_{N_2}	Densidade do Nitrogênio na CNTP	$\rho_{N_2} = 1,2527 \text{ kg/Nm}^3$
ρ_C	Densidade do Carvão Pulverizado	$\rho_C = 600 \text{ a } 800 \text{ kg/m}^3$ dependo do carvão
T	Temperatura média dentro do vaso	Temperatura média do Carvão = 47 °C
T_N	Temperatura do N_2 de alimentação	Temperatura do N_2 = 25 °C
V	Volume interno do vaso	25 m ³

4 DIAGRAMAS EM BLOCOS DOS MODELOS

O modelo do vaso de injeção nos fornecerá como variáveis de saídas principais a taxa de injeção calculada e a posição prevista da válvula dosadora para que o processo de injeção, PCI, forneça naquelas condições, a taxa de injeção solicitada pelo Alto-forno.

O modelo do transporte pneumático nos fornecerá o parâmetro μ do transporte pneumático que auxiliará na melhora da eficiência energética do processo bem como sua influência na variabilidade. Além disto, será possível se obter a velocidade de escoamento das partículas de carvão para que o transporte pneumático não atinja a velocidade crítica mínima de entupimento das lanças de injeção de carvão nos Algaravizes dos altos-fornos.

A Figura 3 ilustra o diagrama geral em blocos dos modelos a serem desenvolvidos tendo como base as variáveis da Tabela 1. As variáveis de entrada são obtidas indiretamente pela taxa de injeção pedida pelo operador do processo.

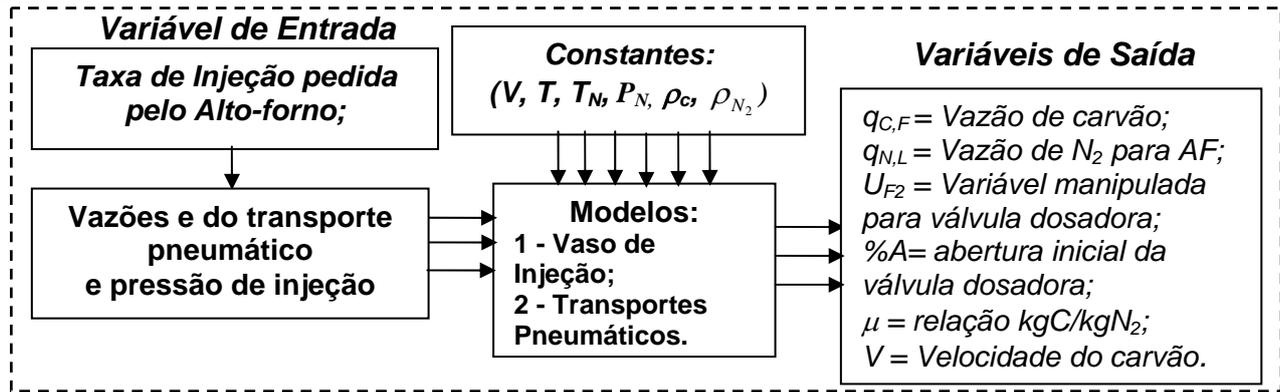


Figura 3. Diagrama em blocos do modelo matemático para o transporte pneumático do PCI.

As três malhas auxiliares do vaso possuem influências fortes e fracas sobre a malha principal, ou, malha de controle de vazão de carvão. A pressão de injeção possui influência direta sobre a capacidade máxima de injeção, haja vista seu gráfico de *set-point* que aumenta com o pedido de vazão de carvão. Porém, a pressão de injeção por sua vez é influenciada indiretamente pela vazão de fluidização. Vazões altas de fluidização contribuem para a fluidez do carvão pela dosadora, mas também contribuem para o aumento e descontrole da pressão interna do vaso.

O *set-point* de vazão de transporte ou arraste por sua vez diminui com o aumento da taxa de injeção para permitir um maior fluxo gás-sólido pela válvula dosadora. Assim, pode-se dizer que a vazão de transporte contribui para a pressão diferencial entre linha e vaso. Quanto maior for a pressão diferencial entre vaso e linha principal maior será a capacidade de injeção do vaso em [t/h].

5 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS VÁLVULAS DE CONTROLE DE VAZÃO E PRESSÃO DE NITROGÊNIO

Os dados de placa das válvulas de controle de vazão de fluidização (FCV1), transporte (FCV3) e controle de pressão (PCV) do PCI foram levantados em campo e enviados ao fabricante Valtek. Todas estas válvulas têm a curva característica de igual porcentagem. O fabricante nos forneceu uma fórmula prática de vazão para suas válvulas, *software* de especificação e simulações, bem com a curva característica de vazão para cada uma.

A partir da curva característica de todas as válvulas podem-se obter as equações que exprimem as vazões normalizadas de nitrogênio pelas três válvulas em função dos *set-point* e das saídas (variáveis manipuladas) dos controladores PID. Porém, as curvas características das válvulas de controle vazão de nitrogênio, a princípio, não são importantes para a modelagem, uma vez que o *set-point* de vazão é sempre atendido. O importante da modelagem das válvulas de controle é somente para o caso da válvula de controle de pressão, onde é interessante se conhecer a vazão de nitrogênio $F_{N, P}$ introduzida no vaso, através da linha de controle de pressão.

6 CONDIÇÕES DE CONTORNO DA MODELAGEM

As condições de contorno para elaboração do modelo do vaso de injeção do PCI da CSN (Figura 2), para o transporte pneumático durante a fase de injeção são:

- válvula prato e válvula de alívio não vazam;
- não existe nenhum vazamento no vaso ou em sua tubulação de nitrogênio;
- volume inicial de nitrogênio do vaso é constante ao longo de toda a fase de injeção;
- válvula PCV possui a mesma curva característica e C.V. que a FCV-1;
- pressão do tanque de armazenagem de nitrogênio é constante (17 Barg); e
- valor de *set-point* de vazão de carvão pedido pelo Alto-forno é constante.

As condições 1 e 2 são semelhantes e pré-condição para a estabilidade do controle e do modelo para ensaios á respostas de mudanças em *set-points*. Estes *set-points* podem ser obtidos pelas das equações a seguir que serão inseridas no modelo. Além disto, existe uma diferença entre a pressão de injeção e de transporte e o Delta P na linha, que é constante para uma vazão fixa.

6.1 Pressão de Injeção

A pressão de injeção é controlada por um PID desejando-se um valor constante durante a fase de injeção, visando-se a menor variabilidade possível na vazão de carvão. O *set-point* da pressão de injeção é determinado pela Equação (1).

$$P_I = P_{Mín} + \frac{P_{Máx} - P_{Mín}}{C_{Máx} - C_{Mín}} \times (C_{REQU} - C_{Máx}) \quad (1)$$

Onde: P_{MAX} = Pressão máxima do vaso = 12 Bar;
 P_{MIN} = Pressão mínima do vaso = 9 Bar;
 C_{MAX} = Vazão máxima de injeção de carvão = 10 t/h;
 C_{MIN} = Vazão mínima de injeção de carvão = 50 t/h; e
 C_{REQU} = Vazão de injeção de carvão solicitada pelo Alto-forno (t/h).

6.2 Vazão de Transporte ou Vazão de Arraste

A vazão transporte ou vazão de arraste é ilustrada pela Equação (2).

$$F_{N,F3} = V_{Mín} + \frac{V_{Máx} - V_{Mín}}{C_{Máx} - C_{Mín}} \times (C_{Máx} - C_{REQU}) \quad (2)$$

Onde: V_{MAX} = Vazão máxima de transporte do vaso = 1200 Nm³/h; e
 V_{MIN} = Vazão mínima de transporte do vaso = 600 Nm³/h.

6.3 Vazão de Fluidização

A vazão de fluidização injetada no cone base do vaso pode ser definida pela Equação (3).

$$F_{N,F1} = V_{Mín} + \frac{V_{Máx} - V_{Mín}}{C_{Máx} - C_{Mín}} \times (C_{REQU} - C_{Máx}) \quad (3)$$

Onde: V_{MAX} = Vazão máxima de fluidização do vaso = 900 Nm³/h; e
 V_{MIN} = Vazão mínima de fluidização do vaso = 300 Nm³/h.

7 MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO COM O MODELO DO VASO DE INJEÇÃO

Os vasos de injeção de carvão são modelados como tanques de pressão de armazenagem de 1ª ordem com sólidos ocupando o espaço físico de 25 m³, parcialmente ocupado por carvão pulverizado. As válvulas de controle de vazão e pressão de N₂ também não têm comportamento linear e sim quadrático, tal como visto no item 5. A área da válvula dosadora possui um comportamento linear somente após 30% de abertura.

Outras não-linearidades surgem na etapa de mistura durante a formação do transporte pneumático de duas fases gás-sólido, tal como a expansão dos gases e a influência da temperatura final da mistura bifásica carvão-nitrogênio.

Os fluxos gás-sólido através da válvula dosadora seguem a lei fundamental de Bernoulli nos diz que o fluxo de um líquido incompressível, q , através de uma restrição pode ser obtido pela Equação (4).

$$q(p_1, p_2) = af_{Liq}(p_1, p_2) = a\sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (4)$$

Onde:

- p_1 = pressão na entrada da restrição, ou pressão a montante;
- p_2 = pressão na saída da restrição, ou pressão a jusante, ou pressão do lado oposto;
- ρ = densidade do fluido escoado; e
- a = área da seção transversal mínima da restrição da válvula dosadora.

O carvão pulverizado pode ser considerado um fluido líquido incompressível. Assim, a vazão de líquidos pode ser considerada a vazão mássica de sólidos, e a densidade será a do próprio carvão:

$$q_{C,F} = q(p_1, p_2), \quad f_{Liq} = f_{Sol} = f_{Carvão} \quad e \quad \rho_{Liq} = \rho_C$$

A pressão na entrada da restrição é a pressão do vaso, ou pressão de injeção, P_I . Na saída da válvula dosadora tem-se a pressão de transporte, ou pressão da linha principal, P_T . A vazão mássica de carvão ($q_{C,F}$) através de uma restrição (válvula dosadora, FCV1) pode ser calculada usando-se a Lei de Bernoulli, ou seja, levando as variáveis do modelo, tem-se a Equação (5).

$$q_{C,F} = af_{Carvão}(p_1, p_2) = a\sqrt{2\rho_C(p_I - p_T)} \quad (5)$$

Onde:

- p_I = pressão de injeção do vaso;
- p_T = pressão de transporte, ou pressão na linha principal;
- ρ_C = densidade do carvão pulverizado; e
- a = área da seção transversal da válvula dosadora;

Para modelagem do fluxo de gás nitrogênio que passa através da válvula dosadora, ($q_{N,F2}$) tem-se que levar em consideração a compressibilidade do gás. Se os efeitos dinâmicos forem negligenciados, a Equação (6) expressa o fluxo mássico de um gás ideal.

$$q_{N,F2} = q(p_1, p_2) = af_{Gás}(p_1, p_2) = a\sqrt{2\rho_{N_2}'(p_I - p_T)} \quad (6)$$

Onde:

- ρ_{N_2} = densidade do Nitrogênio para as condições de pressão e temperatura do vaso (P_1 e T).

Considerando que o volume inicial de nitrogênio gasto na fase de pressurização do vaso é mantido constante ao longo de toda a fase de injeção, tem-se que pela lei de conservação de massa expressa pela Equação (7).

$$q_{N,F2} = q_{N,P} + q_{N,F1} \quad (7)$$

Da mesma forma, tem-se a vazão total de nitrogênio da linha após o injetor será igual a Equação (8).

$$q_{N,L} = q_{N,F3} + q_{N,F2} \quad (8)$$

De posse da taxa de injeção pedida (entrada do modelo), $q_{C,F}$, da quantidade de nitrogênio que deverá passar pela válvula dosadora, $q_{N,F2}$, e da perda de pressão esperada pela dosadora ΔP_{FCV2} , e aplicando-se o princípio da superposição tem-se a expressão final, Equação (9), que permite obter a área requerida para a válvula dosadora.

$$q_{N,F2} + q_{N,F2} = af_{Gás}(p_1, p_2) + af_{Carvão}(p_1, p_2) = a\sqrt{2(p_1 - p_T)} \times \sqrt{\rho_C + \rho_{N_2}} \quad (9)$$

Uma vez obtida a área a da restrição da válvula dosadora, tem-se o produto final da modelagem que é a sua posição de abertura inicial de modo a se obter uma troca de vaso sem perturbações na vazão de carvão pulverizado para o alto-forno.

8 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Os principais parâmetros usados na definição de um transporte pneumático de materiais sólidos granulados em fase densa, segundo Silva⁽⁴⁾ e Mills⁽⁵⁾ são:

- relação $\mu > 5$; e
- velocidade $v < 10$ [m/s].

Estas são os principais parâmetros que diferenciam o transporte pneumático de fase densa em fase diluída. No transporte pneumático em fase diluída, a velocidade é alta levando a um maior desgaste da tubulação quando comparado com a fase densa. Além disto, a eficiência energética do transporte fase densa é maior, pois carrega mais sólidos com a mesma quantidade de gás.

A relação μ é uma grandeza adimensional que pode ser obtida pela Equação (10). Esta equação descreve a relação mássica entre o carvão e o nitrogênio que o transporta na linha principal de injeção.

$$\mu = \frac{kgCarvão}{KgN_2} \quad (10)$$

A Equação (10) pode ser decomposta em termos de medições de vazões mássicas horárias de carvão e nitrogênio, tal como ilustra a Equação (11).

$$\mu = \frac{VazãoMássicadeCarvão}{VazãoMássicadeN_2} \quad (11)$$

A Equação (11) pode sua vez também pode ser decomposta em termos de medições de vazões mássicas de carvão obtidas pelo algoritmo da média móvel do decréscimo do peso do vaso no tempo (Taxa de Injeção), descrito anteriormente, e as medições volumétricas nitrogênio na linha principal, tal como ilustra as dimensões da Equação (12).

$$\mu = \frac{\text{TaxadeInjeção}}{\rho_{N_2} \times \text{VazãoVolumétricade}N_2} = \left[\frac{\frac{t}{h}}{\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \frac{\text{Nm}^3}{h}} \right] = \left[\frac{t \times 1000}{\text{kg}} \right] = [1] \quad (12)$$

A vazão volumétrica horária total de nitrogênio na linha principal pode ser estimada pelo princípio da conservação da massa. Portanto, a vazão volumétrica total de nitrogênio da linha principal de carvão pode ser estimada como sendo a soma das vazões de nitrogênio que passam pela válvula dosadora ($F_{N,F2}$) somada a vazão de transporte adicionada ao injetor, tal como na Equação (13).

$$\text{VazãoVolumétricaTotalde}N_2 = F_{N,F2} + F_{N,F3} \quad (13)$$

Considerando que não existem vazamentos no vaso, as vazões volumétricas de nitrogênio total que entram no vaso podem ser estimadas como sendo a soma das vazões de fluidização mais a vazão pela válvula de controle de pressão. A Equação (14) ilustra:

$$\text{VazãoVolumétricaTotalde}N_2 = F_{N,P} + F_{N,F1} + F_{N,F3} \quad (14)$$

As vazões de nitrogênio de fluidização ($F_{N,F1}$) e nitrogênio de transporte ($F_{N,F3}$) são medidas por transmissores de pressão diferencial inteligente e com placas de orifício especialmente calculadas para a melhor precisão possível. O SDCD, Sistema Digital de Controle Distribuído do Fabricante Yokogawa, possui essas medições *On-line*, bem como os valores das variáveis manipuladas dos controladores PID para os posicionadores pneumáticos de cada válvula de controle.

Considerando que a válvula de controle de pressurização, PCV, possui a mesma curva característica de mesmo comportamento que a válvula de controle de fluidização, FCV2, e que estas curvas tem comportamentos lineares em função do comando (MV) do controlador PID.

Assim, a vazão pela linha de controle de pressão pode ser estimada de acordo com a Equação (15).

$$F_{N,P} = F_{N,F1} \times \frac{\text{FCV2.MV}}{\text{PCV.MV}} \quad (15)$$

Onde: $F_{N,F1}$ = Vazão de fluidização medida;
FCV2.MV = Variável manipulada do controlador de vazão do SDCD; e
PCV.MV = Variável manipulada do controlador de pressão do SDCD.

Levando a Equação (15) na Equação (12) e substituindo em Equação (11), obtemos a Equação (16).

$$\mu = \frac{\text{TaxadeInjeção}}{\rho_{N_2} \times \text{VazãoVolumétricade}N_2} = \frac{\text{TaxadeInjeção}}{\rho_{N_2} \times \left[F_{N,F1} \times \frac{\text{FCV2.MV}}{\text{PCV.MV}} + F_{N,F1} + F_{N,F3} \right]} \quad (16)$$

Apesar destas aproximações grosseiras, a pior situação para o transporte pneumático é para os valores altos de μ ($\mu > 50$). Isto pode ser também calculado considerando-se que a vazão pela linha de controle de pressão é zero ($F_{N,P} = 0$). A única vazão que entra no vaso é a de fluidização ($F_{N,F1}$), considerada aqui a mesma vazão que passa pela válvula dosadora ($F_{N,F2}$). Neste caso em particular, a Equação (16) torna-se a Equação (17) que é mais precisa e interessante, pois fornece o valor crítico de μ , ou $\mu_{M\acute{a}x}$.

$$\mu_{M\acute{a}x} = \frac{\text{TaxadeInjeção}}{\rho_{N_2} \times \text{VazãoVolumétricade}N_2} = \frac{\text{TaxadeInjeção}}{\rho_{N_2} \times [F_{N,F1} + F_{N,F3}]} \quad (17)$$

9 VALIDAÇÃO

Para validação, as Equações (16) e (17) são realizadas *On-line* pelo SDCD e seus resultados mostradas numa tela gráfica do SDCD. Os cálculos foram implementados para cada estação de injeção, fornecendo três valores estimados para o μ atual e três valores estimados para o μ máximo, modelos do vaso de injeção e do transporte pneumático, diversas atividades e medidas foram feitas:

- elaboração de uma simulação das equações de set-point dos controladores de vazão e pressão de N_2 , bem como a taxa de injeção de carvão;
- implantação de medidor de vazão, velocidade e densidade de carvão na linha principal;
- implantação de um medidor de pressão antes do distribuidor;
- cálculo da abertura inicial da válvula dosadora e implantação no controle;
- diagrama de velocidade das partículas de carvão ao longo da tubulação de transporte pneumático m tempo real; e
- modelos dinâmicos das estações de injeção em tempo real.

10 CONCLUSÕES

A maior utilidade destes cálculos é fornecer o parâmetro μ , cujo valor é referencia essencial para ajuste, desempenho e monitoramento do transporte pneumático de carvão pulverizado em fase densa por nitrogênio pressurizado. Os valores de μ maiores que 50 ($\mu > 50$), podem levar ao entupimento da linha principal de injeção com conseqüente redução de produção do alto-forno.

Esta modelagem procurou abranger não só o vaso de injeção bem como todo o processo de injeção desde a estação passando pelo distribuídos e chegando até ao Alto-forno.

Os modelos propostos são mais atuais e exibem variáveis de saída do transporte pneumático e da variabilidade e exibem maiores detalhes que os modelos Birk *et al.* (1999), até então estudados.

Os muitos resultados das simulações de processo efetuadas com o modelo proposto para estação de injeção coincidem e se aproximam com os valores encontrados na a prática do dia-a-dia do processo e as variáveis manipuladas dos controladores do SDCD.

REFERÊNCIAS

- 1 Assis, P.S. (1993); Injeção de Materiais Pulverizados em Altos Fornos / Brasil. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Metais;
- 2 Birk, W. (1999), Johansson, A., Medvedev, A.; Model-Based control for a fine coal injection plant - IEEE Control System Magazine, 19(1), 33-43. February; International conference on control applications (pp 127-132);
- 3 Aguirre, L.A. (2007); Introdução a Identificação e Sistemas - Técnicas Lineares e não-lineares. Aplicadas a Sistemas Reais - Editora UFMG - 3ª Edição;
- 4 Silva, D.R. (2005); Transporte Pneumático: Tecnologia - 1ª Edição; Artliber Editora Ltda. — São Paulo – SP;
- 5 Mills, D. (2004); Pneumatic Conveying Design Guide - Second Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803. London - United Kingdom.