

MODELAGEM DA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE AR QUENTE EM TUBO RETO DE ALTO-FORNO¹

*Alcides José de Lucena Silva²
Bruno da Silva Nora³
Edson da Costa⁴
Luiz Edival de Souza⁵
Ricardo Sebastião Nadur Motta⁶*

Resumo

Este trabalho tem como objetivo modelar o sistema de medição de vazão de ar quente soprado pelas ventaneiras dos altos-fornos da CSN. Este estudo será base para a implantação das medições de vazão e dos intertravamentos de segurança para a injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos. Foram implantadas medições de vazão nos tubos retos do sistema de ar quente soprado dos altos fornos baseados em tubos Venturi. A modelagem do sistema permitiu o calculo do diferencial de pressão a ser ajustado nos transmissores de vazão, levando em consideração as dimensões do Venturi, a densidade do ar quente pressurizado e a compressibilidade do ar. Os resultados foram à definição do Venturi e a especificação dos transmissores de vazão, bem como a automação do processo, sendo contempladas as condições de segurança e intertravamento da injeção de carvão pulverizado.

Palavras-chave: Transmissor de vazão; Tubo reto; PCI; Alto-forno.

MODELING OF HOT AIR FLOW MEASUREMENT IN STRAIGHT TUBE OF BLAST FURNACES

Abstract

This work has the objective to model the system for measuring flow of hot air blown by the tuyeres of blast furnaces. This study will be the basis for the implementation of flow measurements and safety interlocks for the injection of pulverized coal in blast furnaces. They were implanted flow measurements in straight pipes of the hot air system for blast furnace blown based on refractory Venturi tubes. The modeling system allowed the calculation of the pressure differential to be adjusted in flow transmitters, taking into account the dimensions of the venturi, the air density and compressibility of the hot pressurized air. The results were the definition of the Venturi and the especification of flow transmitters, as well as process automation, and addressed the conditions of safety and interlocks for the injection of pulverized coal.

Key works: Flow transmitter; Tube straight; Injection pulverized coal; Blast furnace.

¹ *Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.*

² *Engenheiro Eletricista – brunonbp@hotmail.com – (24) 9901-5127;*

³ *Professor Titular da UNIFEI - Avenida BPS, 1303 - CEP37500 - Itajubá - MG
bortoni@unifei.edu.br*

⁴ *Professor Titular da UNIFEI - Avenida BPS, 1303 - CEP37500 - Itajubá - MG.
edival@unifei.edu.br*

⁵ *Doutorando em Controle de Processos pela UNIFEI e Engenheiro de Desenvolvimento Sênior da CSN. Rod. BR 393 - Lúcio Meira km 5001 - S/Nº Vila Santa Cecília - Volta Redonda -RJ - nadur@csn.com.br – (24) 9261-8905*

1 INTRODUÇÃO

O sistema de vazão de ar soprado pelo tubo reto necessita de transmissores de vazão de ar quente para realizar os intertravamentos de segurança do processo. Este equipamento monitora a vazão de ar soprado nos tubos retos para cada algaraviz, onde sinalizará o entupimento ou a vazão baixa de ar soprado para este equipamento que, para o Alto-forno 3, tem seu limite inicialmente estabelecido em 60 Nm³/min. Atingindo uma das duas condições será efetuada a purga automática fechando a válvula de carvão e abrindo a válvula de nitrogênio de alta pressão.

O equipamento que monitora a vazão de ar soprado no tubo reto é um transmissor de vazão pela pressão diferencial, cujas tomadas de pressão alta e baixa estão instaladas no Venturi de cerâmica interna ao tubo reto.

Um entupimento no algaraviz ou na ventaneira devido a deslocamento de cascão pode causar a explosão do conjunto porta-vento com conseqüente parada de emergência do Alto-forno devido ao acúmulo do carvão injetado e não queimado. O sistema de injeção de carvão pulverizado deverá por segurança fechar a válvula de carvão e acionar automaticamente a respectiva válvula de nitrogênio de pressão alta para purga e refrigeração, evitando assim o acúmulo de carvão no interior do algaraviz.

O objetivo deste trabalho é de criar um memorial de cálculo, para obter um ajuste padrão dos transmissores de vazão e possibilitar um intertravamento mais seguro para os altos-fornos da CSN.

Nos cálculos deste trabalho foram consideradas as condições reais do ar soprado pelo processo, sendo utilizado os valores do ar na CNTP adquirida no trabalho de Bortoni e Souza.⁽¹⁾ diferentemente dos trabalhos de Siglÿeri e Nishinori,⁽²⁾ e Alli,⁽³⁾ que foram as referências base para o desenvolvimento dos cálculos do nosso trabalho. As condições do intertravamento segurança tiveram como referência os trabalhos de Johansson e Medvedev,⁽⁴⁾ Birk, Johansson e Medvedev⁽⁵⁾ para a injeção segura do carvão pulverizado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O método utilizado foi à obtenção dos valores do diferencial dos transmissores de vazão, por meio da Equação de Bernoulli e considerando o equilíbrio energético, mas, além disto, foram utilizadas as condições reais do processo. Foram realizadas as verificações por meio da automação existente, comparando os valores adquiridos da vazão do Motosoprador, com o somatório das vazões de todos os transmissores de vazão de cada tubo reto.

Os materiais foram: Transmissores de vazão, SDCD Centum CS da Yokogawa, cartões de entrada analógica, handheld Hart e tubo de Venturi.

3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O Alto-forno tem o objetivo de extrair o ferro metálico a partir de seu minério. Isto é conseguido fazendo-se uma corrente de ar altamente aquecida passar em contra corrente por uma carga metálica, coque e calcário que desce pela coluna interna do Alto-forno.

O ar aquecido é insuflado na região inferior do forno através dos conjuntos porta-vento, que estão conectados ao anel de vento. O ar soprado para o Alto-forno começa seu processo nos motosopradores, que têm a função de soprar o ar a uma temperatura de cerca de 200°C para o regenerador. A o passar pelo regenerador

aquecido, o ar sofrerá uma elevação para a temperatura de 1.100°C. Logo após, o ar quente é distribuído para o Alto-forno pelos conjuntos porta-vento.

O sistema de ar soprado consta de quatro regeneradores que trabalham de modo paralelo dois a dois alternadamente. Enquanto dois estão aquecendo, os outros dois estão soprando ar quente para o anel de vento. Do anel de vento este ar quente pressurizado é distribuído para cada tubo reto que por sua vez alimenta o algaraviz, passando pela ventaneira até alimentar o forno com o ar quente, onde forma o *Race-Way* e este provoca a combustão do carvão pulverizado injetado pelas lanças.

O Anel de vento tem o propósito de distribuir o ar aquecido pelos dos regeneradores, para o Alto-forno, através dos conjuntos porta-vento. Os principais equipamentos do conjunto porta-vento são o tubo reto, o algaraviz, o resfriador de ventaneira e a ventaneira propriamente dita.

O sistema de injeção de carvão pulverizado, PCI, é o processo no qual ocorre a moagem do carvão mineral, em granulometrias em que facilite sua queima, para que seja injetado no Alto-forno por meio de suas lanças através das ventaneiras. Este proporciona uma energia térmica com um custo reduzido pela combustão de carvão.

O intertravamento da vazão tem o objetivo de proteger o conjunto porta-vento contra acúmulo de carvão pulverizado. O objetivo é efetuar a purga em caso de vazão baixa no tubo reto, evitando assim a explosão do algaraviz, por acúmulo de carvão.

A Figura 1 ilustra o sistema simplificado de sopro de ar quente para o Alto-forno, onde se pode ver o transmissor de vazão do Motosoprador e os transmissores de cada um dos tubos retos do Alto-forno.

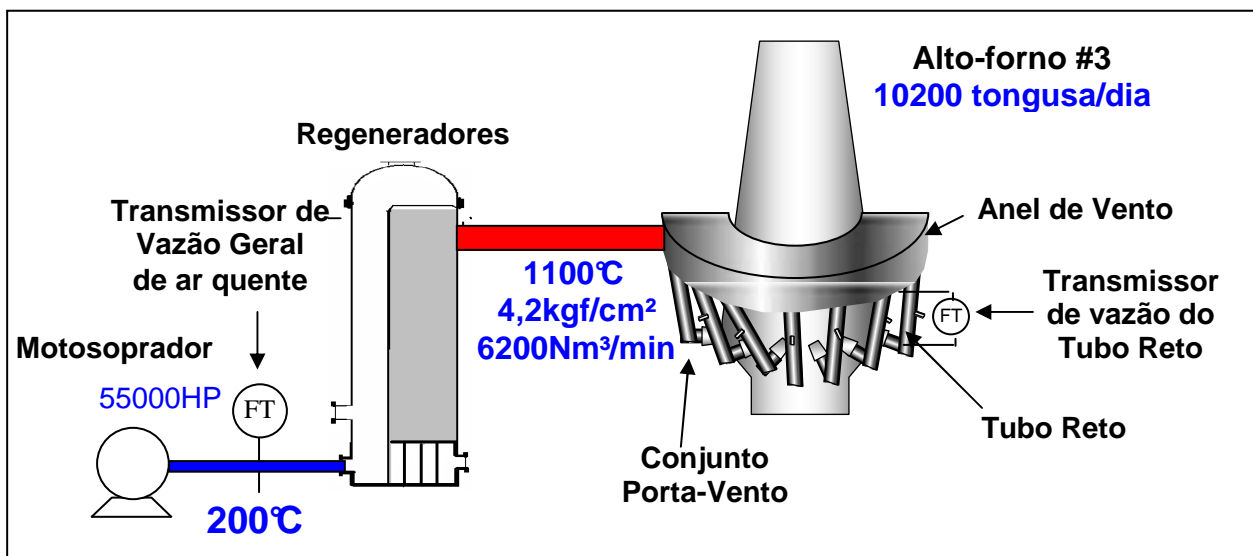


Figura 1 – Sistema de ar quente soprado para o Alto-forno 3 da CSN.

4 FAIXAS DE VAZÃO CARACTERÍSTICAS DO AR SOPRADOR

A Tabela 1 ilustra as principais características das vazões máximas de sopro para cada Alto-forno, bem como o número de ventaneiras e a vazão individual de cada ventaneira.

A vazão máxima de cada tubo reto pode ser estipulada para cada Alto-forno em função da vazão máxima de cada ventaneira. Porém, deve-se levar em consideração que na pratica pode-se ter até no máximo 20 % de ventaneiras isoladas.

Além disto, a distribuição de vazão de sopro entre algaravizes pode variar em até $\pm 20\%$. Portanto, a máxima vazão do tubo reto deve ser recalculada, como na Tabela 1.

Tabela 1 – Vazão e Pressão Nominal de sopro dos Altos-fornos da CSN

AF	Temp. Sopro (°C) T_s	Pressão Sopro (kgf/cm ²) P_s	Vazão Máxima de Sopro (Nm ³ /min)	Ventaneiras	Vazão Máx. de cada Ventaneira (Nm ³ /min)	Faixa de Medição (Nm ³ /min)
2	1200	2,5	3200	24	200	0 a 200
3	1100	4,2	6800	38	272	0 a 300

5 DENSIDADES DO AR SOPRADO NOS ALTOS FORNOS 2 E 3

Como o fluido a ser analisado nas equações de vazão do próximo item é o ar quente soprado pelo anel de vento tem-se que, calcular a densidade do ar pela equação (1) para as condições de temperatura e pressão do ar quente soprado do anel de vento através dos tubos retos para todos os algaravizes do Alto-forno.

Para obtenção da densidade do ar (ρ_{AR}), é adquirido sua fórmula através da dedução, obtendo assim a equação (1) a seguir.

$$\rho_{AR} = \rho_{0AR} \times \frac{T_0 P_s}{T_s P_0} \quad (1)$$

Onde:

T_s = Temperatura do ar quente soprado em (K)

P_s = Pressão do ar quente soprado em (kgf/cm²)

Para a CNTP, de acordo com [1], a densidade do ar tem os seguintes valores:

$$T_0 = 0^\circ C = 273K$$

$$P_0 = 1atm = 101,327kPa$$

$$\rho_{0AR} = 1,2932 \frac{kg}{m^3}$$

A - Para o Alto-forno 3:

$$\rho_{AR} = 1,2932 \times \frac{273 \times 509,9}{1373 \times 101,3} = 1,2939 \frac{kg}{m^3}$$

B - Para o Alto-forno 2:

$$\rho_{AR} = 1,2932 \times \frac{273 \times 343,0}{1473 \times 101,3} = 0,8113 \frac{kg}{m^3}$$

6 VAZÕES PARA O TUBO RETO DOS ALTOS-FORNOS 2 E 3

O desenvolvimento do modelo matemático para o cálculo da diferença de pressão, ΔP , do transmissor de vazão do tubo reto leva em consideração a densidade do fluido, que neste caso é o ar quente soprado pelo anel de vento.

O sistema usado para a análise matemática é mostrado na Figura 2 a seguir. Ele foi desenvolvido usando o balanço energético com a equação de Bernoulli (2), no estado estacionário, conforme usado em Siglüreri e Nishinori⁽²⁾ e Alli.⁽³⁾

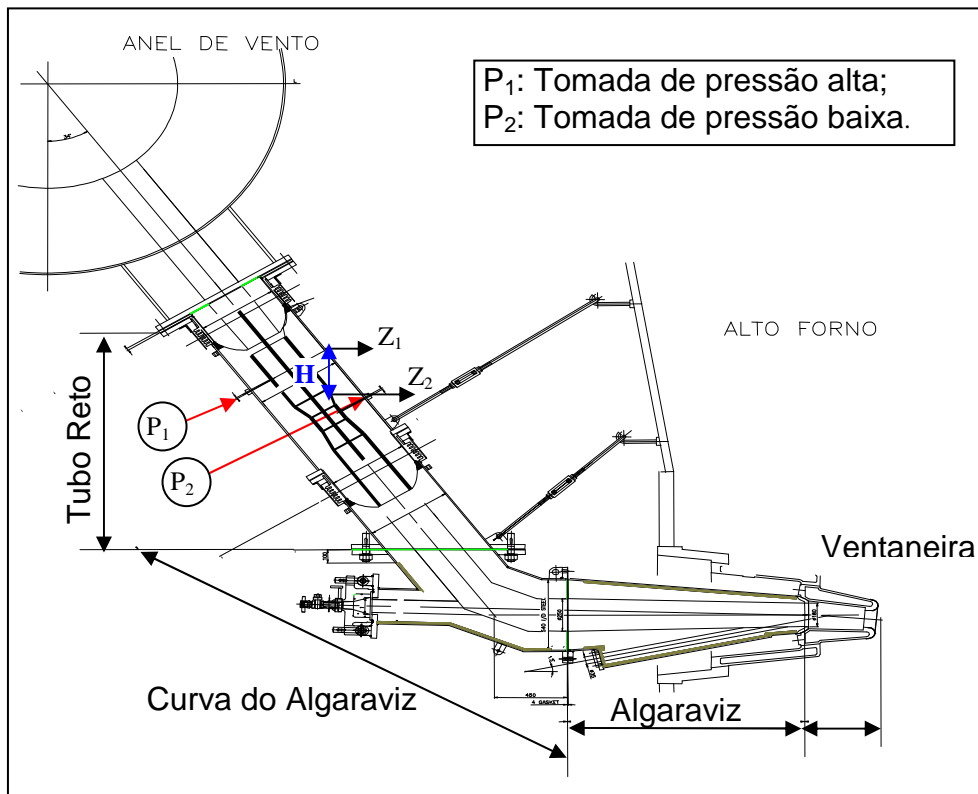


Figura 2 – Modelo analisado para a medição de vazão do tubo reto.

A equação (2) mostrada a seguir, leva em conta todas as considerações feitas anteriormente.

$$\frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \int_1^2 \frac{dp}{\rho_{AR}} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + W_s + \text{perdas}_{1-2} \quad (2)$$

Onde:

- V_1, V_2 = Velocidade média do fluido em (m/s);
- Z_1, Z_2 = Altura H nos pontos 1 e 2, respectivamente em (m);
- g = Aceleração da gravidade = 9,81 (m/s²);
- dp = Diferencial da queda de pressão ao longo do Venturi em (Pa);
- ρ = Densidade do ar quente soprado, calculado por (1) em (kg/m³);
- W_s = Trabalho mecânico realizado pelo fluido no sistema;
- Perdas_{1-2} = Perdas de pressão por atrito através do tubo de Venturi.

Efetuada-se as considerações a seguir:

- O trabalho realizado no Tubo de Venturi é zero ($W_s = 0$);
- As perdas por atrito são desprezadas ($Perdas_{1-2} = 0$);
- A queda de pressão devido à diferença de altura H entre as tomadas de pressão alta e baixa é desprezível perante o Δp .

Alli⁽³⁾ considerou que a densidade do fluido é constante e os efeitos da compressibilidade do gás são desprezíveis. Neste trabalho, adicionou-se a variação da densidade do ar quente de acordo com as condições de temperatura e pressão nominais de sopra, e incorporou-se os efeitos da compressibilidade do ar quente soprado. Ela deve ser considerada para cada Alto-forno, tal como visto na equação (1).

Substituindo a equação da continuidade na equação (2), com o objetivo de isolar V_2 , e multiplicando o resultado pelo valor da área da restrição: A vazão através do Tubo Venturi em (m^3/s) pode ser obtida pela equação dos gases perfeitos.

Existem alguns efeitos considerados no sistema que são viscosidade, inércia e atrito do ar dentro da restrição do Venturi. Por causa destes efeitos, a queda real da pressão será maior do que a considerada na equação (2). Assim, para correção existe um coeficiente de multiplicação da vazão teórica, conhecido por C_d (coeficiente de distúrbio). Inicialmente vamos considerar $C_d = 0,985$. Este número será revisto mais tarde para adaptação ao material refratário, que consiste as partes internas dos tubos retos, e onde está localizado o Venturi.

Então, para a expressão do cálculo real da vazão desnormalizada no tubo reto é dada pela equação (3), a seguir:

$$Q_{real} = C_d a \sqrt{\frac{2 \times \left(\frac{\Delta P}{\gamma} + gH \right)}{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4}} \quad (3)$$

Onde:

D e d = Diâmetros internos do tubo reto nos pontos 1 e 2, respectivamente, em [m];

Δp = Queda de pressão ($p_1 - p_2$), em (N/m^2), ou (Pa);

a = Área da restrição de diâmetro d ;

Q = Vazão no tubo reto, em (m^3/s).

No sistema projetado, os efeitos da compressibilidade do ar foram incluídos matematicamente na análise pela correção da densidade do ar. O valor de $2gH$ pode ser desprezado, pois seu valor é insignificante perante a queda de pressão na restrição.

Levando-se em consideração que a densidade do ar (ρ_{AR}) é a do ar quente soprado calculado pela equação (1) anterior, temos finalmente, o valor prático de ΔP para ajuste no transmissor de vazão pode ser tal como a equação (4).

$$\Delta P = \frac{\rho_{AR}}{2} \times \left(\frac{Q_{real}}{C_d a} \right)^2 \times \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (4)$$

7 SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA O INTERTRAVAMENTO DO PCI

Para que o sistema de injeção de carvão pulverizado, PCI, seja seguro, os intertravamentos de vazão baixa nos tubos reto são fundamentais conforme

mostrado nos trabalhos de Johansson e Medvedev,⁽⁴⁾ Birk, Johansson e Medvedev⁽⁵⁾ pois a combustão do carvão é assegurada somente quando há presença de “race-way”, ou seja, somente com vazão pela ventaneira. O elemento primário de medição de vazão projetado é um Venturi de cerâmica moldado e concretado internamente ao tubo reto, tal como na Figura 2.

As tomadas de impulso de pressão diferencial deste Venturi foram obtidas através de perfurações na cerâmica e de válvulas manuais para manutenção e desobstrução das tomadas na parada do Alto-forno. As tubulações das tomadas de impulso de alta e baixa são conduzidas até a sala de abrigo dos transmissores de pressão diferencial que fornecem a medição da vazão de cada tubo reto.

A Figura 3 ilustra todos os transmissores de vazão do Alto-forno 3 e a Figura 4, em especial, o transmissor de vazão do tubo reto 15 do Alto-forno 3.



Figura 3 – Transmissores de vazão.



Figura 4 - Transmissor 15.

A Figura 5 ilustra o anel de vento e o percurso das tubulações vindas das tomadas de pressões altas e baixas para a sala de instrumentação, onde estão localizados os transmissores de vazão de ar soprado de cada tubo reto.



Figura 5 – Tomada de impulso dos transmissores de pressão diferencial.

7.1 Cálculos da Pressão Diferencial do Alto-forno 3

O cálculo da pressão diferencial para calibração do instrumento de medição de vazão do tubo reto para as condições de operação do sopro de ar quente do Alto-forno 3 é descrita a seguir.

As características do ar quente soprado pelo tubo reto do algaravizes do AF 3 juntamente com a faixa de escala de vazão nas CNTP desejada para o instrumento, $Q_0=300$ (Nm^3/min), devem ser considerados na equação (3).

A equação dos gases perfeitos (5) nos possibilita obter o valor da vazão do ar quente, Q_{real} , para a condição de operação do Alto-forno.

$$\frac{P_s Q_{real}}{T_s} = \frac{P_0 Q_0}{T_0} \quad (5)$$

$$Q_{real} = \frac{101,3 \times 300 \times 1373}{273 \times 509,9} = 299,74 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) = 5 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

Os dados dimensionais do Venturi interno ao tubo reto do AF 3, e os demais dados para a aplicação em (4) são mostrados a seguir.

Tendo todos os valores necessários, conseguimos obter o valor do diferencial de pressão, a ser calibrado no transmissor de vazão para os tubos retos do Alto-forno #3:

$$\Delta P = \frac{1,2939}{2} \times \left(\frac{5}{0,985 \cdot 0,023} \right)^2 \times \left(1 - \left(\frac{0,17}{0,25} \right)^4 \right)$$

$$\Delta P = 24577,8(\text{Pa}) = 245,78(\text{mBar}) = 2506,24(\text{mmH}_2\text{O})$$

7.2 Cálculos da Pressão Diferencial do Alto-forno 2

Para o Alto-forno 2, a escala original escolhida para o SDCCD foi de 0 Nm^3/min a 200 Nm^3/min . A temperatura (1.127°C) e pressão manométrica ($2,5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) de operação do ar quente soprado deve ser desnormalizada para se determinar o valor da vazão, e então obter a diferença de pressão, ΔP , para se ajustar nos transmissores de vazão em campo. Os transmissores de vazão por diferença de pressão geralmente tem seu ΔP ajustado em mmH_2O .

$$Q_{real} = \frac{101,3 \times 200 \times 1473}{273 \times 343} = 318,8 \left(\frac{m^3}{min} \right) = 5,31 \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

Tendo todos os valores necessários, conseguimos obter o valor do diferencial de pressão para o Alto-forno 2 a partir da equação 4. Para a escala de vazão de 0 Nm³/min a 200 Nm³/min no Alto-forno 2, a pressão diferencial a ser calibrada no transmissor de vazão é:

$$\Delta P = \frac{0,8113}{2} \times \left(\frac{5,31}{0,985 \cdot 0,025} \right)^2 \times \left[1 - \left(\frac{0,18}{0,25} \right)^4 \right]$$

$$\Delta P = 13767,5(Pa) = 137,67(mBar) = 1403,89mmH_2O$$

8 IDENTIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Um dos meios de se comprovar a fórmula e a medição obtida é através da soma dos 38 valores de vazão dos tubos retos para o AF3 e 24 valores de vazão para o AF2 e comparamos com o valor da vazão total de sopro medida por outros instrumentos de vazão com erro de 0,1%, localizados no Motosoprador cujos sinais são aplicados para o PCI.

Foram implantadas duas telas gráficas no SDCD ilustrando os perfis de vazão num gráfico radial simbolizando o alto-forno em corte. Algumas das ventaneiras estão sem a medição de vazão devido a danos no Venturi, e outras estão isoladas por questões operacionais (Ponto quente no cadinho).

As medidas das vazões dos altos fornos 2 e 3 efetuadas pelos transmissores do Motosoprador foram comparadas com o somatório das vazões individuais de cada tubo reto para validação do modelo desenvolvido para medição de vazão. Os valores reais obtidos do Alto-forno 3 são ilustrados na Figura 6.

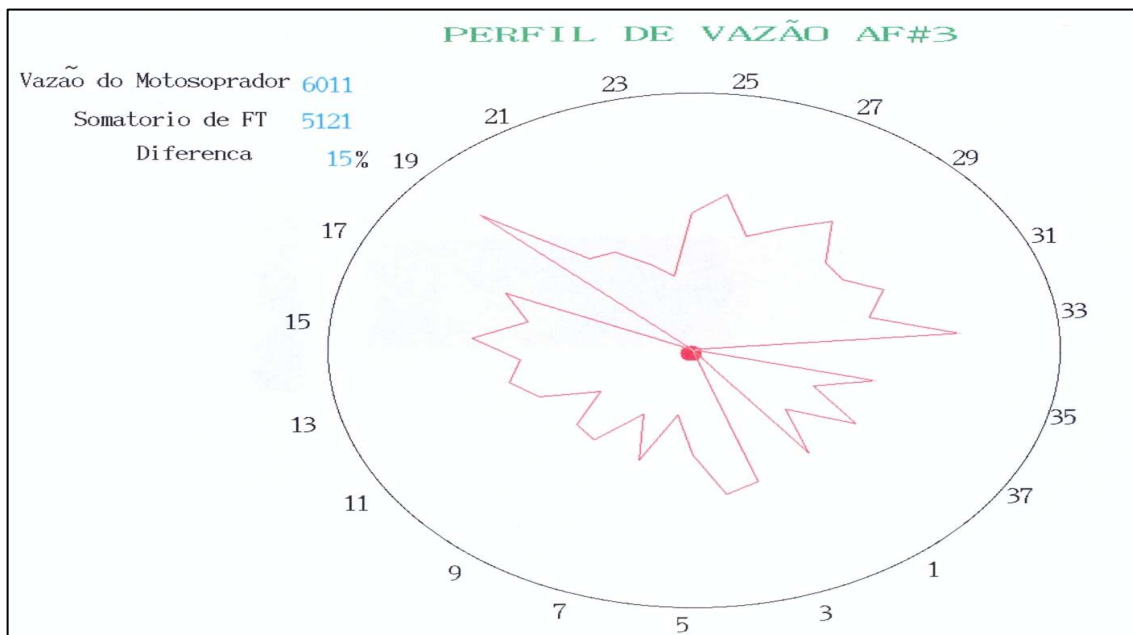


Figura 6 – Perfil de vazão e validação da medição de vazão.

Como podemos observar, o somatório das vazões está 15% menor que a vazão obtida pelo transmissor de vazão geral do Motosoprador. Isto leva a conclusão que o Venturi refratário sofre desgaste ou erosão com a passagem do

sopro de ar quente. A restrição do Venturi de diâmetro d tende a se desgastar com o tempo, se aproximando do diâmetro D , e por consequência diminuindo a pressão diferencial da medição de vazão.

9 INFLUÊNCIA DO DESGASTE NA RESTRIÇÃO

As influências do desgaste da restrição do Venturi interno do tubo reto na medição de vazão são estudadas. O desgaste determina também a vida útil do tubo reto, normalmente em torno de 5 anos. O gráfico da Figura 7 ilustra o acerto percentual da medição de vazão que é afetado pela relação d/D , ou seja, a medida que ocorre o desgaste do Venturi, o valor d diâmetro da restrição se aproxima ao diâmetro normal da tubulação.

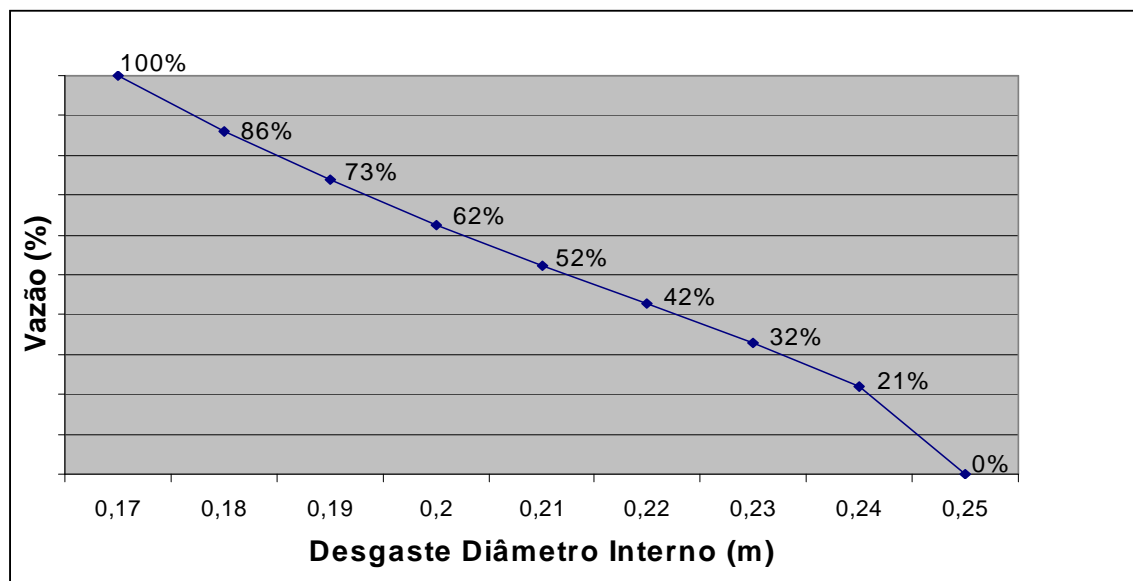


Figura 7 – Influência do desgaste de d na medição da vazão.

10 RESULTADOS ALCANÇADOS

Os principais resultados foram o resgate do memorial de cálculo visto na equação (4) e aferição do sistema de medição de vazão de ar quente soprado pelas ventaneiras visando propiciar o intertravamento de segurança exigido pelo processo de injeção de carvão.

Conseguiu-se também como resultado deste trabalho os perfis de distribuição de vazão em corte nas ventaneiras de cada Alto-forno ilustrados em telas gráficas do SDCD ilustrado na Figura 6, bem como um modelo de comparação em tempo real do somatório das medições, com a medição geral advinda dos motosopradores, como ilustrado na Figura 6.

No AF3 tinha-se a medição errada da vazão o que propiciava um intertravamento errado para as lanças de injeção de carvão pulverizado. Isto foi conferido aplicando-se um método novo de identificação e ajustagem, onde o somatório dos transmissores de vazão individual de cada ventaneira foi comparado com o transmissor de vazão geral da linha de ar frio do Motosoprador.

No AF2 como havia muitos alarmes por vazão alta nos tubos retos, por haver muitas ventaneiras paradas, a vazão tinha o seu valor aumentado em cada um dos tubos retos restantes, chegando facilmente no seu valor de intertravamento por

vazão alta, por este motivo aumentou-se a escala de vazão de 160 para 200 (Nm³/min), este valor é encontrado na Tabela 1.

11 DISCUSSÃO

Alli⁽³⁾ teve o intuito de desenvolver um método de medição de vazão pelo diferencial de pressão, mas em nosso trabalho obteve-se um resultado mais preciso, nos ajustes, por considerar as condições reais de sopro, como densidade do ar soprado, pressão, temperatura, viscosidade do ar, atrito do ar com o tubo de Venturi e a inércia. O equipamento utilizado neste trabalho tem mais de 10 anos, a única dificuldade deste sistema é o de mantê-lo em funcionamento.

12 CONCLUSÃO

A modelagem para o cálculo da medição da pressão diferencial dos transmissores de vazão dos tubos retos dos altos fornos foi efetuada com maior precisão levando-se em consideração a densidade do ar soprado e realimentação de um modelo de comparação do instrumento de vazão do Motosoprador. Além disto, pode-se avaliar o desgaste do Venturi com o passar dos anos e programar a troca daquele com maior desgaste.

O intertravamento de segurança será mantido em um padrão, de acordo com o desgaste do Venturi e com o ajuste padrão da calibração de todos os transmissores de vazão, além de se aferir o transmissor de vazão do Motosoprador.

REFERÊNCIAS

- 1 Bortoni, E.C; Souza, Z. Instrumentação para Sistemas Energéticos e Industriais. Itajubá/ MG: Gráfica e Editor Novo Mundo Ltda, 2006;
- 2 Siglūeri, L; Nishinori A. Controle Automático de Processos Industriais. São Paulo/ SP: Editor Edgard Blūcher Ltda, 1992;
- 3 Alli, F. Development of a measurement system of blast flow rate in the tuyere breast of Arcelor Mittal Moulding Blast furnace A. São Luiz/ MA: 38° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas & 3rd International Meeting, September/2008.
- 4 Johansson, A; Medvedev, A. Detection of Incipient Clogging in Pulverized Coal Injection Lines. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36, Nº 3, May/June 2000.
- 5 W. Birk, Johansson, A; Medvedev, A. Model-based for a fine coal injection plant. IEEE Control System Mag., vol.19, pp. 33-43, Feb.