

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Desenvolvimento de um sistema de medição de vazão de ar por ventaneira no Alto-Forno A da ArcelorMittal Monlevade”

Autor: Fabiano Cristeli de Andrade
Orientador: Prof. Dr. Roberto Parreiras Tavares

Julho – 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Fabiano Cristeli de Andrade

“DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE AR POR
VENTANEIRA NO ALTO-FORNO A DA ARCELORMITTAL MONLEVADE”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa
Orientador: Prof. Dr. Roberto Parreiras Tavares

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008

Aos meus pais e exemplos de vida, Carlos e Cristina. Aos meus irmãos e amigos, Rodrigo e Leandro. E em especial à minha esposa e grande amor Luciana.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Roberto Parreiras Tavares pela orientação na condução deste trabalho.

Ao Professor Vicente Tadeu Lopes Buono pelos valiosos conselhos.

Aos colegas da ArcelorMittal Monlevade que apoiaram, incentivaram e colaboraram na realização dos estudos e desenvolvimento industrial, especialmente à equipe do alto-forno A nas pessoas do Fabiano Harley de Araújo, Arilson de Oliveira Mol, Márcio Inácio dos Anjos, Carlos Gomes e Seleme Marlon Dias parceiros em grande parte do trabalho. Ao colega da ArcelorMittal Research, Thiago Rabelo, pela ajuda na pesquisa bibliográfica.

Ao Juliano Henrique Silva, então estagiário do alto-forno A, pela ajuda no desenvolvimento matemático.

Ao colega Leonardo Neves pela convivência e companheirismo durante os estudos.

Aos Engenheiros Rodrigo Junqueira dos Santos, José Alencar dos Santos, Gerson Alves Menezes e Augusto Espescht pela confiança e apoio.

À Universidade Federal de Minas Gerais pela infra-estrutura e pelo curso de excelente qualidade na formação profissional dos Metalurgistas.

À minha esposa, Luciana, pela compreensão e ajuda, e aos meus pais e meus irmãos, pelo apoio.

Em especial à ArcelorMittal Belgo, pela oportunidade de aperfeiçoamento pessoal e profissional.

SUMÁRIO	Página
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE NOTAÇÕES	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Introdução	4
3.2. Teoria da Medição de Vazão	8
3.2.1. Introdução a teoria da medição de vazão	8
3.2.2. Tipos de medidores de vazão	9
3.2.3. Medidor Venturi	12
3.2.4. Equacionamento matemático de um Medidor Venturi	16
4. METODOLOGIA	20
4.1. Modelamento Matemático de um Venturi no Conjunto Porta-vento do AF-A	20
4.2. Análise das Dimensões Físicas do Conjunto Porta-vento do AF-A	24
4.3. Teste em Escala Industrial	33
4.3.1. Eliminação de ruídos e automação do sistema	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
6. CONCLUSÕES	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE FIGURAS	Página
Figura 3.1 – Evolução do “coke rate” e da taxa de injeção no alto-forno A entre 2000 e 2007 (ArcelorMittal Monlevade, 2008)	4
Figura 3.2 – Evolução da distribuição da vazão de ar por ventaneira durante curto intervalo de tempo (Bolsigner, 2003)	6
Figura 3.3 – Distribuição do carvão injetado por ventaneira em alto-forno de 16 ventaneiras na Alemanha (Weiser, 2000)	6
Figura 3.4 – Medidores de vazão por diferencial de pressão (Ibars, 2004)	9
Figura 3.5 – Perda de carga em porcentagem do diferencial de pressão vs. relação entre o diâmetro da garganta (d) e da tubulação principal (D) (Ibars, 2004)	11
Figura 3.6 – Perda de carga relativa para um tubo Venturi (Ibars, 2004)	13
Figura 3.7 – Princípio de funcionamento de um tubo Venturi (Ibars, 2004)	14
Figura 3.8 – Coeficientes de descarga C_d para medidores Venturi (ASME, 1955)	19
Figura 4.1 – Localização esquemática do estrangulamento proposto para o “down-leg” do alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade	21
Figura 4.2 – Desenho refratário do “down-leg” do alto-forno A (ArcelorMittal Monlevade, 2006)	25
Figura 4.3 – Cone convergente do Venturi do “down-leg” alto-forno A	26
Figura 4.4 – Cone divergente do Venturi do “down-leg” alto-forno A	26
Figura 4.5 – Dimensões finais do Venturi do “down-leg” alto-forno A	27
Figura 4.6 – Machos utilizados no refratamento do Venturi do “down-leg” alto-forno A	27
Figura 4.7 – Diferencial de pressão empregado no Venturi do “down-leg” alto-forno A	28
Figura 4.8 – Malha de controle implementada para Venturi do “down-leg” alto-forno A	29
Figura 4.9 – “Down-leg” com Venturi adaptado pronto para ser utilizado no alto-forno A (detalhe das duas tomadas de pressão do Venturi)	30

Figura 4.10 – “Down-leg” com Venturi adaptado pronto para ser utilizado no alto-forno (detalhe da tomada única de pressão, a direita, e termopar, a esquerda do “down-leg”)	31
Figura 4.11 – “Down-leg” com Venturi adaptado em operação na ventaneira 14 no alto-forno A	32
Figura 4.12 – Sistema de purga instalado no “Down-leg” da ventaneira 14 no alto-forno A	34
Figura 5.1 – Vazão de ar calculada na ventaneira 14 no alto-forno A em fevereiro de 2007	35
Figura 5.2 – Correlação entre a vazão de ar calculada na ventaneira 14 e a vazão total de ar do soprador durante reduções de vazões no alto-forno A em fevereiro de 2007	36
Figura 5.3 – Vazões de ar calculadas nas ventaneiras 6, 14 e 21 do alto-forno A durante 5 dias, 17 a 21 de junho de 2007	36
Figura 5.4 – Vazões horárias de ar nas ventaneiras 6, 14 e 21 do alto-forno A durante 3 horas, 10 de junho de 2007	37
Figura 5.5 – Tela do sistema supervisório do alto-forno com as vazões de ar calculadas nas ventaneiras 6, 14 e 21	38
Figura 5.6 – Vista de baixo para cima de um “down-leg” para o conduto circular do alto-forno	39
Figura 5.7 – Vista de material obstruindo parcialmente a saída do conduto circular para o “down-leg” da ventaneira 14 em maio de 2007 (no alto à esquerda, vista do conduto circular)	39
Figura 5.8 – Queda na vazão de ar no alto-forno durante manobra de regeneradores do AF-A	40

LISTA DE TABELAS**Página**

Tabela III-1 - Dados comparativos dos principais medidores de vazão (Delmée, 1983)	11
Tabela III-2 - Resumo das dimensões e relações propostas para um tubo Venturi	15
Tabela IV-1 - Principais dados de projeto do alto-forno A	20

LISTA DE NOTAÇÕES

v_1, v_2	=	velocidades médias do fluido nos pontos 1 e 2 respectivamente, em [m/s]
z_1, z_2	=	altura dos pontos 1 e 2 respectivamente, em [m]
g	=	aceleração da gravidade, em [m/s ²]
P	=	pressão exercida pelo fluido
ρ	=	densidade do fluido
W_s	=	trabalho mecânico que o fluido realiza no sistema
d_1, d_2	=	diâmetros da tubulação nos pontos 1 e 2 respectivamente, em [m]
Q	=	vazão volumétrica de ar passando pela ventaneira, em [m ³ /s]
μ	=	viscosidade do fluido
MM	=	massa molar do fluido, em [g/mol]
R	=	constante dos gases
T	=	temperatura do fluido, em [K]
V	=	volume do gás
FE	=	tubo Venturi (confeccionado no “down-leg”)
PDT	=	transmissor de pressão diferencial
PT	=	transmissor de pressão (instalado no anel de vento)
TE	=	termopar (instalado no anel de vento)
FY	=	computador de vazão

RESUMO

Com o objetivo de conhecer a distribuição radial da vazão de ar soprado no alto-forno, este trabalho buscou alternativas para implantar um sistema de medição de vazão de ar confiável nos conjuntos porta-vento do alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade. Foram consideradas as principais metodologias de medição de vazão de fluidos disponíveis na literatura, dentre os quais o medidor Venturi, que mostrou ser o mais viável tecnicamente. Foi elaborado um estudo matemático e uma análise física da viabilidade de implantação deste tipo de um medidor no trecho reto “down-leg” do conjunto porta-vento. Ao final foi realizado um teste em escala industrial para validação do estudo.

Após o teste industrial foi verificado que o valor de vazão encontrado em uma ventaneira foi próximo do esperado matematicamente. Além disso, o comportamento da vazão ao longo do tempo apresentava uma tendência semelhante ao da vazão total de ar soprado. Com a implantação do medidor Venturi desenvolvido em dois outros “down-legs” percebeu-se uma boa repetibilidade do sistema desenvolvido e, com isso, pode-se concluir que o sistema desenvolvido para medir a vazão de ar em cada ventaneira no alto-forno A é confiável, de fácil implementação e baixo custo.

Após a implantação desse sistema em todas as 22 ventaneiras do alto-forno A, previsto para final de 2011, espera-se poder visualizar a partição da vazão de ar em cada quadrante do alto-forno, e com isso inferir sobre desgaste localizado no cadinho, formação de cargas inativas dentre outras correlações.

Além disso, este sistema servirá de base para a implantação de um sistema de controle da quantidade de carvão injetado em cada ventaneira. A expectativa da implantação deste controle é obter uma distribuição equitativa do ar e do carvão injetado em cada ventaneira e com isso conseguir reduzir o consumo de combustíveis a partir de um melhor controle do fluxo gasoso dentro do alto-forno.

ABSTRACT

Aiming to know the radial distribution of the air flow rate in the Blast Furnace "A" at ArcelorMittal Monlevade, a study was carried out about alternatives to install a trustworthy system of measurement air flow rate in the tuyere. The main available methodologies of measurement of fluid flow had been considered in the literature, amongst which the measurer Venturi, whom it technical showed to be most viable. It was elaborated a mathematical study and a physical analysis of the viability of implantation of this type of a measurer in the straight stretch named "down-leg" of the tuyere. An industrial test for validation of the study was carried out too.

After the industrial test was verified that the value of air flow rate found in a tuyere was next to the waited mathematically. Moreover, the behavior of the air flow rate during the time showed a similar trend to the total air blown rate. With the implementation of the measurer Venturi in two others "down-legs" was perceived a good repeatability of developed system and, with this, to conclude that the developed system to measure the air flow rate in each tuyere in the blast furnace was trustworthy, easy and with low cost implementation.

After the implementation of this system in 22 tuyeres of the Blast Furnace "A", foreseen to end of 2011, will be able to know the partition of the air flow rate in each quadrant of the Blast Furnace "A" and associate with hearth wear, skull formation and others blast furnace phenomena.

Moreover, this system will be the base for implementation of a system of control of the amount of coal injected in each tuyere. The expectation of this project is to get an equal distribution of air and the coal injected in each tuyere allowing decrease the fuel rate with an improvement in the gaseous flow inside of the blast furnace.

1. INTRODUÇÃO

A produção de ferro-gusa utilizando o alto-forno como reator é atualmente a mais utilizada pela siderurgia brasileira e mundial. O processo se dá basicamente pelo carregamento alternado de camadas de coque (ou carvão) e de matérias-primas metálicas (minério granulado, pelotas e sinter) contendo o minério de ferro, no topo do alto-forno. O ar quente (com temperaturas até 1.200°C) é soprado para dentro do alto-forno pelas ventaneiras. O ar soprado queima o combustível (coque, assim como os combustíveis auxiliares injetados via ventaneiras). Neste processo de queima, o oxigênio do sopro é transformado em monóxido de carbono (gás CO) criando vazios na frente das ventaneiras. Esses vazios gerados fazem com que a carga vá descendo no interior do forno. O gás gerado possui elevada temperatura ($2.100 \sim 2.300^{\circ}\text{C}$) aquecendo e queimando o coque e reduzindo e fundindo a carga metálica nas regiões superiores do alto-forno. Em sua fusão o minério de ferro produz gusa e escória, os quais gotejam até o cadinho e de onde são removidos através do furo de corrida. Essa característica de processo em contracorrente faz do alto-forno um processo extremamente eficiente.

Face ao tipo de reator, que opera fechado sob pressão com a presença de sólidos, líquidos e gases em contracorrente, o monitoramento do processo através das variáveis operacionais é de fundamental importância para uma operação segura e econômica.

Informações tais como análise química do ferro-gusa, pressão e vazão de ar soprado, quantidade de carvão injetado nas ventaneiras, dentre outras, são algumas das informações de processo utilizadas corriqueiramente para monitoramento do processo do alto-forno. Vale destacar que ainda nas décadas de 70 e 80, modelos matemáticos aplicados a alto-forno começaram a ser desenvolvidos como forma de otimizar a operação e conhecer o estado interno do reator.

Neste cenário insere-se o alto-forno A na ArcelorMittal Monlevade. Este equipamento teve seu "start-up" em dezembro de 1.999 substituindo cinco antigos altos-fornos de pequeno porte, originalmente projetados para operar com carvão vegetal, que possuíam baixo nível de automação e equipamentos defasados tecnologicamente. O novo alto-forno A foi um projeto que ocorreu dentro de um processo de

“benchmarking” com a ArcelorMittal Gent, então Sidmar, na Bélgica, pertencente ao mesmo grupo, que apresentava (e ainda apresenta) resultados entre os melhores do mundo em operação de alto-forno. Por este motivo a alto-forno A foi equipado com o que há de mais moderno, como exemplo, a utilização de “staves coolers” no cadinho e corpo do forno, sistema “bell less top” no topo, modelo de distribuição de cargas, dentre outros.

Passados os primeiros anos de operação, tempo necessário para o melhor domínio do equipamento e disseminação entre a equipe da nova filosofia de trabalho (operação a coque), a área de redução da ArcelorMittal Monlevade tem buscado novas alternativas para maximizar os resultados alcançados até o momento. Em 2005, após visitas de profissionais da ArcelorMittal Monlevade a alto-fornos na Europa, foi identificada a oportunidade de implantação de um sistema de medição e controle de vazão de ar por ventaneira, onde o objetivo principal seria equalizar as vazões entre as ventaneiras. Este sistema que estava sendo implantado em um alto-forno francês (até aquela época talvez o primeiro alto-forno no mundo a dispor deste recurso) tinha como objetivo levar a uma maior uniformidade do fluxo gasoso dentro do forno e por consequência a uma redução no consumo de combustíveis.

Com esse objetivo a ArcelorMittal Monlevade decidiu em 2006 partir para um desenvolvimento interno de um sistema de medição da vazão de ar por ventaneira do alto-forno A utilizando conceitos de fenômenos de transporte e testes em escala industrial.

Este trabalho visa então desenvolver uma forma efetiva e confiável de medição da vazão de ar por ventaneira no alto-forno A de Monlevade de modo que possa permitir no futuro o controle destas vazões e da quantidade de carvão a ser injetado em cada ventaneira. De acordo com os especialistas em alto-forno isso poderá permitir manter uma estabilidade operacional do reator, elevar a produtividade e reduzir o consumo de combustíveis, notadamente o de coque metalúrgico.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma forma de medir a vazão de ar por ventaneira no alto-forno A transformando essa informação em uma ferramenta importante para a análise do processo diário. Em um futuro próximo, este trabalho poderá servir como base para a implantação de um sistema de controle destas vazões e da quantidade de carvão injetado em cada ventaneira o que permitiria a otimização do consumo de combustíveis.

Para chegar a este objetivo maior, têm-se os objetivos específicos:

- estudar as principais alternativas de medidores de vazão e verificar aquele que mais se adequa à finalidade;
- fazer o desenvolvimento matemático deste medidor de vazão no trecho reto, denominado “down-leg” do conjunto porta-vento;
- implementar um modelo para teste em escala industrial visando identificar os ruídos e a precisão do sistema;
- validar este medidor de vazão como ferramenta confiável para medição da vazão de ar por ventaneira no alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

Meios de otimização do processo do alto-forno são um tema chave hoje na área de redução. Trabalhos visando à correlação da qualidade das matérias-primas com a performance do alto-forno, aperfeiçoamento de equipamentos e instrumentos para um melhor monitoramento e o desenvolvimento de modelos matemáticos que visam auxiliar a operação do alto-forno estão entre os principais campos de trabalhos explorados atualmente nos meios acadêmicos e industriais.

No alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade não é diferente. Desde o “start-up”, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando a otimização do processo produtivo de gusa. Os principais resultados em termos de consumo de combustíveis no alto-forno A são mostrados na figura 3.1. Ao longo dos anos foi possível reduzir o “coke rate” e aumentar a taxa de injeção para valores anuais acima de 150kg/t após 2004. Em 2003 a tendência de otimização do processo foi interrompida devido a necessidade de reparo emergencial dos 3 regeneradores o que afetou a temperatura de sopro.

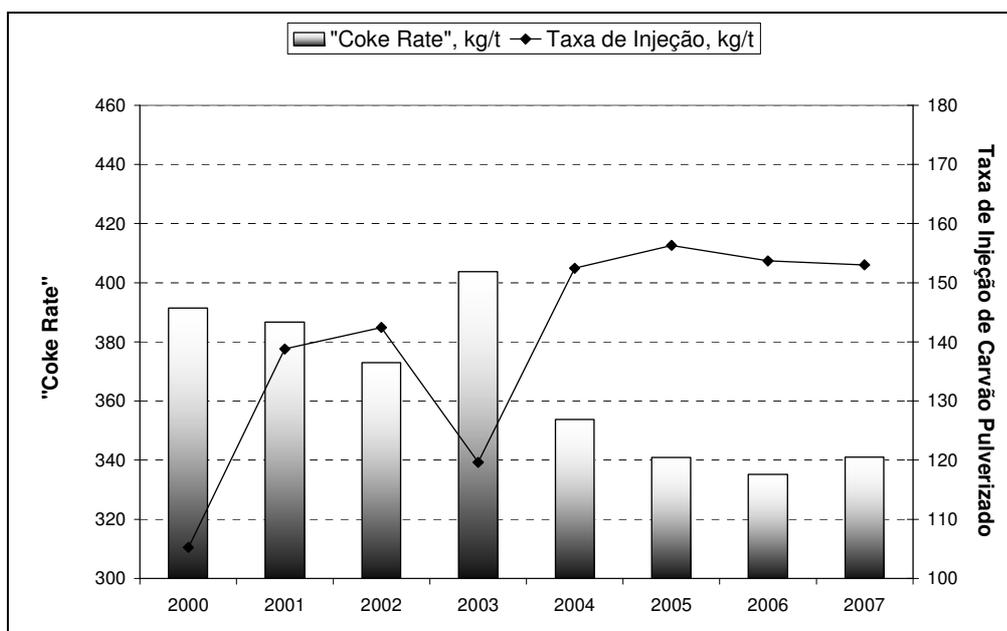


Figura 3.1 – Evolução do “coke rate” e da taxa de injeção no alto-forno A entre 2000 e 2007 (ArcelorMittal Monlevade, 2008)

Um dos campos de trabalho mais explorado é relacionado à redução do consumo de combustíveis. Em virtude da importância do assunto, notadamente devido o alto custo das matérias-primas empregadas, principalmente o coque, muito tem se discutido com respeito a formas de otimização do consumo de combustíveis nos altos-fornos. O emprego de modelos de distribuição de cargas, modelos que estimam a posição e o formato da zona coesiva dentro do alto-forno, são exemplos de como tentar melhorar o fluxo gasoso e assim otimizar a troca térmica e as reações de redução dentro do alto-forno. Com esse espírito, essa dissertação teve o foco direcionado para o desenvolvimento de um sistema capaz de medir a vazão de ar soprado em cada ventaneira no alto-forno A e com isso disponibilizar mais uma ferramenta de monitoramento do processo do alto-forno.

A idéia inicial desse projeto foi dada por Santos (2005) após visita técnica a altos-fornos na Europa, mais precisamente na França, onde foi visitado um alto-forno que acabara de desenvolver um sistema de medição e controle da vazão de ar em cada ventaneira, com o intuito de equiparar a quantidade de ar soprado em cada ventaneira. Além desse sistema, fora implantando também um sistema de medição e controle da quantidade de carvão injetado em cada ventaneira. Segundo Bolsigner (2003), a idéia básica foi implementar um medidor de vazão do tipo diferencial de pressão nos “down-legs”, seguido de uma válvula controladora de vazão e um sistema de controle de carvão por linha de injeção. Com esta malha de controle seria possível equiparar a entrada de ar e de carvão ao longo do perímetro de todo o forno e desta forma manter um fluxo gasoso mais estável e favorável a redução.

A figura 3.2 mostra as vazões em cada uma das 40 ventaneiras no alto-forno 4 da ArcelorMittal Dunkerque, em um curto intervalo de tempo, medidas em janeiro de 2003. Nota-se a assimetria das vazões de ar entre as ventaneiras.

Segundo Weiser (2000), principalmente para fornos que operam com alta taxa de injeção ($> 160\text{kg/t}$) e sem sistema de controle da quantidade de carvão por linha, podem ocorrer perturbações no sistema de injeção que podem levar a uma sobrecarga de carvão em determinadas regiões do cadinho e, em contrapartida, a falta de carvão em outras regiões. A figura 3.3 ilustra este fenômeno em um alto-forno de 16 ventaneiras na Alemanha.

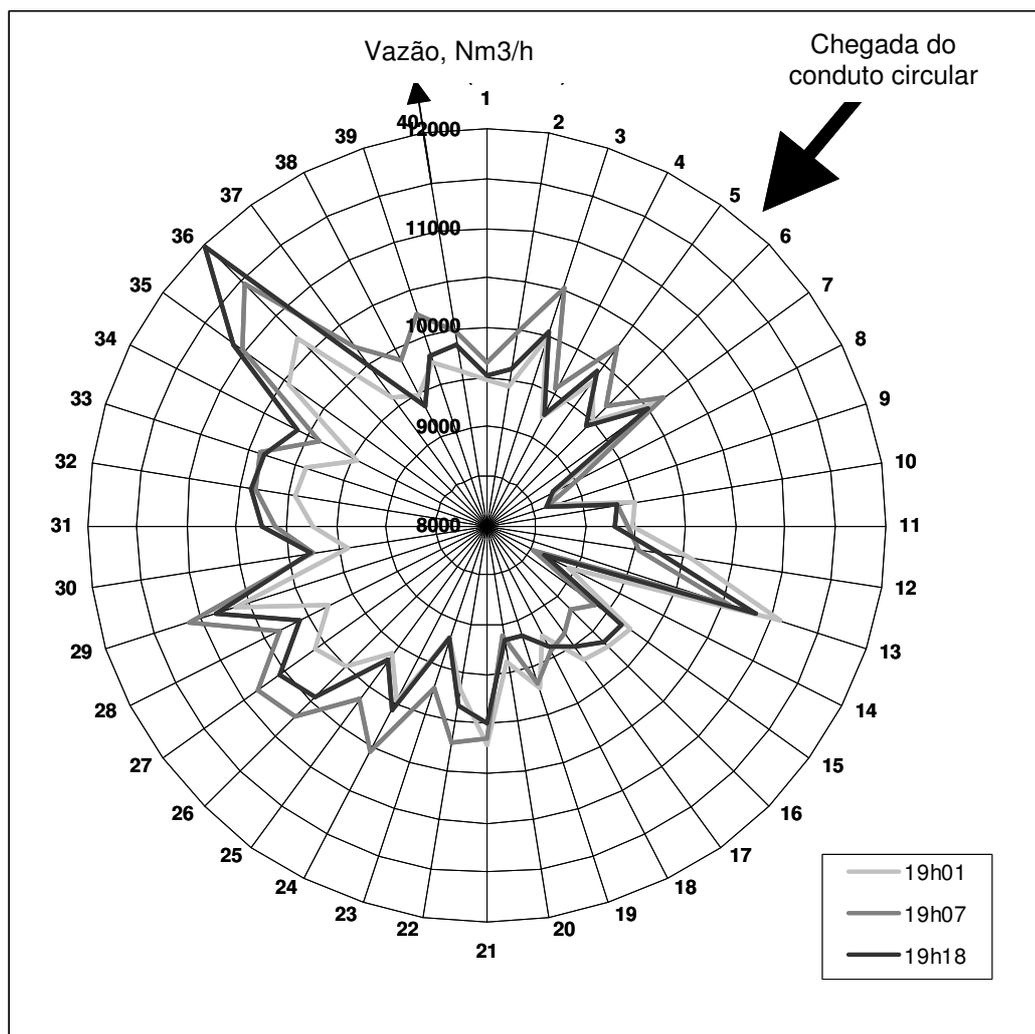


Figura 3.2 – Evolução da distribuição da vazão de ar por ventaneira durante curto intervalo de tempo (Bolsigner, 2003)

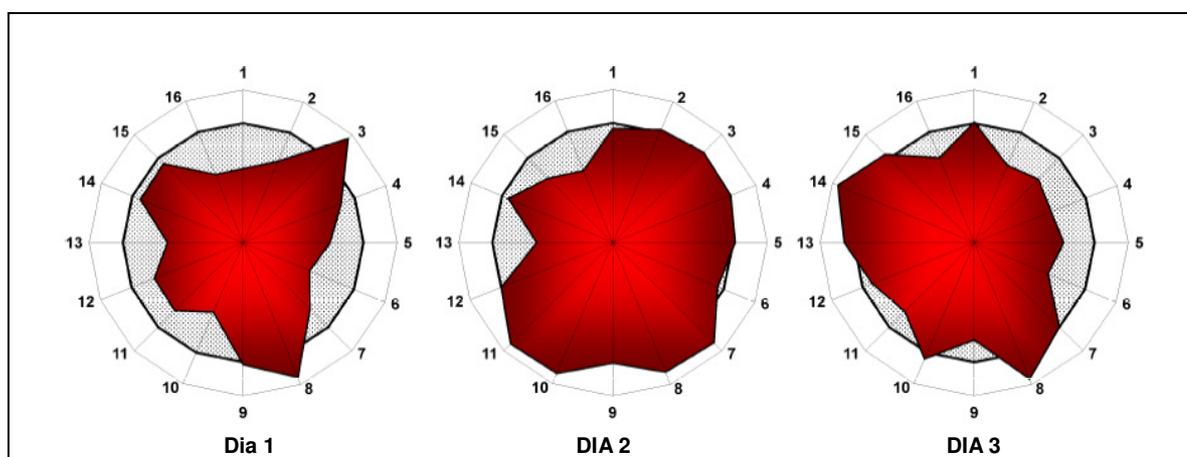


Figura 3.3 – Distribuição do carvão injetado por ventaneira em alto-forno de 16 ventaneiras na Alemanha (Weiser, 2000)

É de se esperar que a maioria dos alto-fornos, que não possuem sistemas de controle da vazão de ar e de carvão por ventaneira, possua algum tipo de assimetria, conforme listado a seguir:

1. assimetria do fluxo gasoso ao longo do perímetro do forno;
2. assimetria da temperatura de chama;
3. assimetria da altura da zona coesiva;
4. assimetria da descida de carga;
5. sobrecarga de carvão não queimado em determinadas regiões do cadinho, o que pode levar a uma queda acentuada da permeabilidade nesta região.

Os efeitos indesejados decorrente destas assimetrias seriam um desgaste localizado do cadinho do alto-forno, picos de perda térmica, tendência a formação de carga inativa, aumento da pressão de sopro, perda de produtividade e aumento do consumo de combustíveis, mais precisamente de coque. Vale destacar que os efeitos listados são mais pronunciados naqueles altos-fornos que operam com elevada produtividade, alta taxa de injeção de finos e baixo consumo de coque.

Como o alto-forno A possui o controle da quantidade de carvão injetado por linha, mas não possui controle de vazão de ar por ventaneira, é de se esperar ganhos relativos a produtividade e consumo de combustível com a implantação do sistema proposto. É neste contexto que se encaixa o trabalho de desenvolvimento interno de um sistema de medição da vazão de ar por ventaneira, utilizando conceitos de fenômenos de transporte.

3.2. Teoria da Medição de Vazão

3.2.1. Introdução a teoria da medição de vazão

Em muitas situações, a operação eficiente e o controle de processos metalúrgicos e de montagens experimentais requerem informações relativas às quantidades de fluido que estão escoando. Para medidas de escoamentos em dutos fechados, existe uma grande variedade de equipamentos, tais como: medidores de pressão, medidores de área variável, etc.

Segundo a norma ABNT NBR ISO 5167-1 (2008), que trata da medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial inserido em condutos forçados de seção transversal circular, o princípio deste método de medição baseia-se na instalação de um elemento primário (como uma placa de orifício, um bocal ou um tubo Venturi) em uma tubulação completamente cheia, na qual o fluido está escoando. A instalação do elemento primário provoca uma diferença de pressão estática entre o lado a montante e a garganta ou o lado jusante do elemento. A vazão pode ser determinada a partir do valor medido dessa diferença de pressão, do conhecimento das características do fluido que escoar, bem como das circunstâncias em que o elemento está sendo usado.

Analisando o trecho reto ou “down-leg” de um alto-forno, podemos identificar as condições necessárias para a implantação de um mecanismo de medição de vazão baseado em diferencial de pressão, uma vez que é possível implantar tomadas de pressão neste trecho. O fluido neste caso é uma mistura homogênea de ar enriquecido com oxigênio e vapor de água a altas temperaturas. A escolha correta de um determinado instrumento para medição de vazão vai depender de vários fatores, dentre os quais, pode-se destacar:

- exatidão desejada para a medição;
- tipo de fluido: se líquido ou gás, limpo ou sujo, número de fases, etc.;
- condições termomecânicas: níveis de pressão e temperatura nos quais o medidor deve atuar (entre outras propriedades);
- espaço físico disponível;
- custo, etc.

3.2.2. Tipos de medidores de vazão

Segundo Ibars (2004), a necessidade de quantificar o fluxo de líquidos tem sido reconhecida desde o início da civilização. A demanda por suprimento de água e energia contribuiu para o desenvolvimento de técnicas de medição de nível, vazão e volume de líquidos e gases. Muitas das teorias básicas da medição de líquidos foram desenvolvidas nos séculos XVII e XVIII, por cientistas como Torricelli, Pitot, Woltman e Venturi. Desde o século XIX até a atualidade, a evolução dos medidores acompanhou o desenvolvimento tecnológico.

De um modo geral, a maioria dos métodos propostos baseia-se na variação do nível de líquidos, no caso de dutos livres, ou ainda na variação da pressão, no caso de condutos fechados.

O instrumental para a medição de vazão é muito diversificado, mas devido à facilidade de medição, diversos autores e pesquisadores utilizam processos de medida tipo diferencial de pressão, o que será o caso neste trabalho.

Os medidores do tipo diferencial de pressão constituem cerca de 50% dos equipamentos utilizados em condutos forçados. O Venturi é o medidor com melhor desempenho entre os seus similares, na categoria de medidores de obstrução, basicamente por apresentar a menor queda de pressão no sistema e boa precisão. A figura 3.4 apresenta os três medidores de vazão por diferencial de pressão mais utilizados (Ibars, 2004).

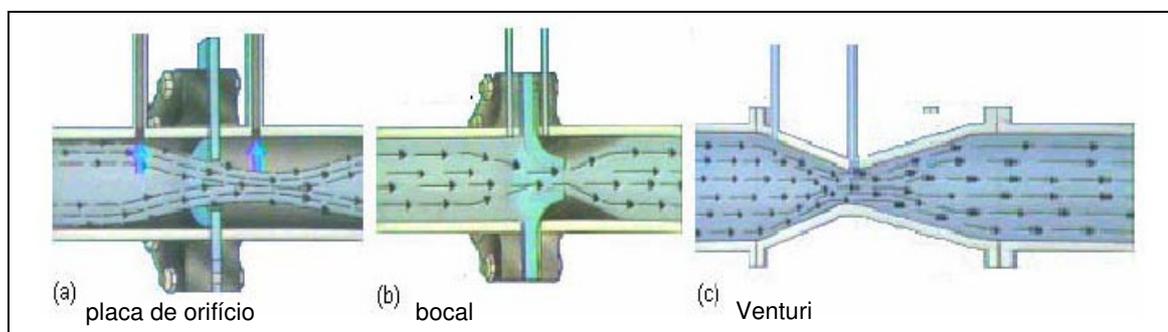


Figura 3.4 – Medidores de vazão por diferencial de pressão (Ibars, 2004)

Os medidores diferenciais são dispositivos que promovem uma redução na seção de escoamento de uma tubulação, de modo a produzir uma diferença de pressão, em consequência do aumento da velocidade do fluido no trecho estrangulado.

Uma importante consideração válida para todos os elementos baseados na aplicação do teorema de Bernoulli é a sua sensibilidade ao regime de fluxo, recomendando uma velocidade uniforme em toda a seção, ou em outras palavras, que o número de Reynolds seja sempre maior do que 10.000 (Delmée, 1983).

Segundo Ibars (2004), estima-se que na atualidade pelo menos 75% dos medidores de vazão industriais sejam dispositivos de pressão diferencial. Dentre as suas vantagens destacam-se a construção simples, não possuindo partes móveis e com funcionamento de fácil entendimento, baixo custo comparado a outros tipos de medidores de vazão, podendo ser utilizados para a maior parte dos fluidos, além de existir diversas publicações sobre as aplicações industriais. As principais desvantagens são a amplitude de medição menor que outros tipos de medidores, sinal de saída não linear com a vazão, necessidade de trechos compridos de tubulação para a montagem, precisão menor que a de medidores mais modernos.

As placas de orifício são de fácil construção e de custo relativamente baixo quando comparadas com o tubo Venturi, que é de construção mais complexa e custo relativo maior. O bocal fica em uma situação intermediária. As placas de orifício apresentam perda de carga residual maior que o Venturi. A perda de carga do bocal padrão é também maior que a apresentada pelo Venturi, porém menor que a ocasionada pelas placas. Na figura 3.5, Ibars (2004) apresenta a perda de carga em porcentagem do diferencial de pressão em função da razão entre o diâmetro da menor e da maior seção (d/D). Na tabela III-1 são apresentadas algumas das principais características dos medidores de vazão por diferencial de pressão, segundo Delmée (1983).

Segundo Ibars (2004), dentre os medidores de vazão por diferencial de pressão, o Venturi é o que provoca a menor perda de carga, e conseqüentemente, é a opção mais recomendável quando existe limitação na energia a ser dispendida.

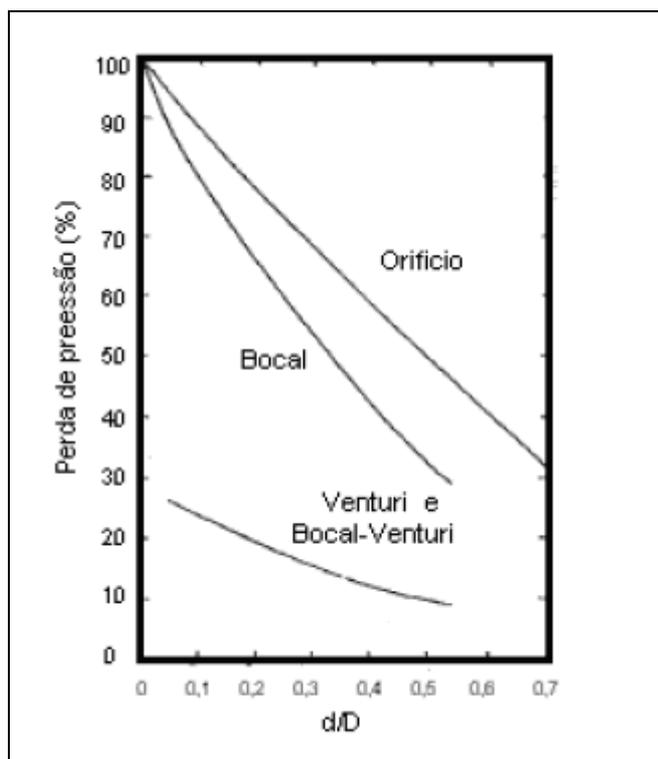


Figura 3.5 – Perda de carga em porcentagem do diferencial de pressão vs. relação entre o diâmetro da garganta (d) e da tubulação principal (D) (Ibars, 2004)

Tabela III-1 – Dados comparativos dos principais medidores de vazão (Delmée, 1983)

Tipo de medidor de vazão	Líquidos limpos	Líquidos corrosivos	Gases/vapores	Temperaturas altas
Placa de orifício	Recomendado	Recomendado	Recomendado	Recomendado
Bocal	Recomendado	Aplicável	Recomendado	Aplicável
Venturi	Recomendado	Aplicável	Recomendado	Aplicável

No caso do alto-forno A, que opera sempre no limite da pressão do soprador, a opção por um Venturi seria a mais adequada, para não aumentar mais a perda de carga já existente na linha de ar quente. Além disso, vale destacar que relação d/D esperada seria mínima devido a restrição das dimensões internas do “down-leg”.

3.2.3. Medidor Venturi

O medidor Venturi é um aparelho que foi desenvolvido por Clemmens Herschel, em 1881, que leva o nome de G. B. Venturi, um filósofo italiano que foi o primeiro engenheiro hidráulico a desenvolver experimentos com tubos divergentes (Ibars, 2004).

Uma das formas indiretas de medição de vazão consiste em usar outras variáveis físicas geradas pelo fluido, como queda de pressão, velocidade, força, etc., e por meio da medição da variação destes parâmetros, determinar o valor da vazão. Normalmente a medição de vazão efetua-se com elementos que medem o diferencial de pressão, e nessa categoria encontra-se o Venturi.

Segundo Delmée (1983), o tubo Venturi pertence à categoria dos elementos primários geradores de pressão diferencial e pode operar com líquidos, gases e vapores, sendo instalado em série com a tubulação e podendo ser instalado em trechos relativamente curtos de tubulação. É aplicado nas medições de ar de combustão de caldeiras, gases de baixa pressão onde se requer perda de carga permanente reduzida. Ainda segundo Delmée (1983), os tubos Venturi podem ser fabricados usando-se qualquer material, desde que sejam realizados de acordo com as dimensões recomendadas. De acordo com Ibars (2004), o medidor Venturi com cone de fundição é o mais utilizado em tubulações de diâmetro de até 800mm. Outros materiais usados na fabricação são aço inoxidável, níquel, brinze, fibra de vidro, policloreto de vinil, titânio, etc.

Como o “down-leg” do alto-forno A é revestido de refratário isolante, a idéia foi adaptar a forma empregada na concretagem para o formato de um Venturi, utilizando o refratário como material de confecção do Venturi. As vantagens do emprego do refratário seria o baixo custo de aplicação, a resistência a altas temperaturas (usualmente acima de 1.100°C) e a facilidade de adaptação ao “down-leg” utilizado atualmente.

De acordo com Ibars (2004), o medidor Venturi é normalmente usado em tubulações com diâmetro de 100 a 800mm, para medição de vazões de fluidos de $5\text{Nm}^3/\text{h}$ a $10^6\text{Nm}^3/\text{h}$.

O down-leg do alto-forno A possui um diâmetro interno de cerca de 200mm, além disso, a vazão de ar soprado no alto-forno é cerca de $130.000\text{Nm}^3/\text{h}$, o que correspondente a uma vazão média esperada para cada ventaneira de $6.000\text{Nm}^3/\text{h}$, o que estaria de acordo com a citação em Ibars (2004).

O tubo Venturi combina dentro de uma unidade simples, uma curta garganta cilíndrica entre duas seções cônicas de maior diâmetro, sendo a primeira convergente e a segunda divergente. Seu objetivo é acelerar o fluido e temporariamente abaixar sua pressão. A recuperação da pressão em um tubo Venturi é bastante eficiente, sendo seu uso recomendado quando se deseja uma maior recuperação de pressão (menor perda de carga). A figura 3.6 mostra as dimensões típicas e a evolução da perda de carga ao longo de um tubo Venturi.

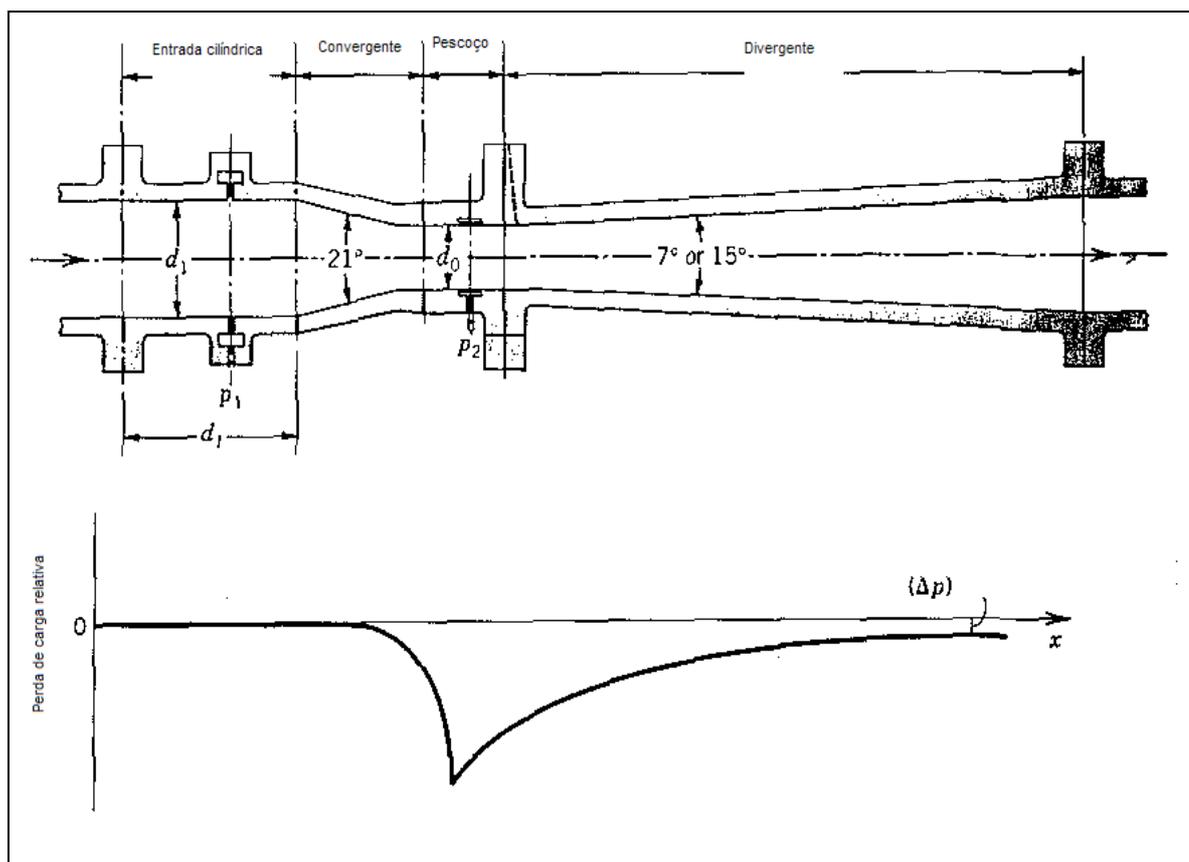


Figura 3.6 – Perda de carga relativa para um tubo Venturi (Ibars, 2004)

A figura 3.7 ilustra o princípio de funcionamento do tubo Venturi. A diferença de pressão h é medida entre os pontos A e C.

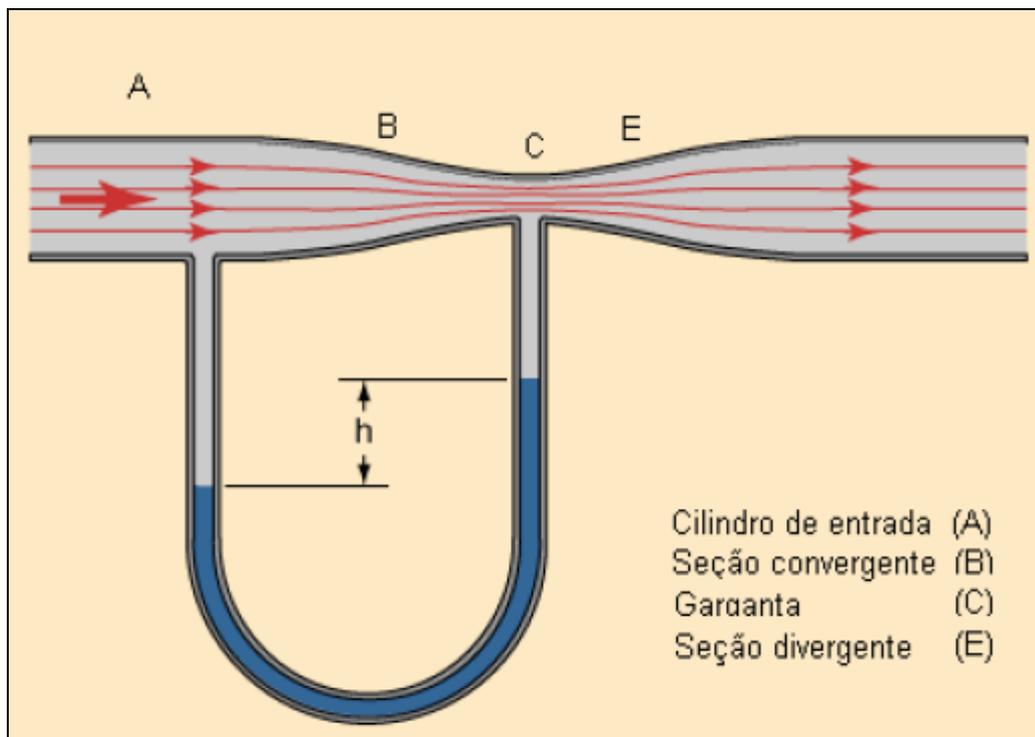


Figura 3.7 – Princípio de funcionamento de um tubo Venturi (Ibars, 2004)

Conforme trabalho de Ibars, (2004) que cita Leopoldo *et al.*, (1979) e Losada (1988), o medidor Venturi compõe-se de uma seção à montante do mesmo diâmetro da tubulação, seguido de uma seção cônica convergente, uma garganta cilíndrica e de uma seção cônica gradualmente divergente, que leva a uma seção cilíndrica com a medida do tubo original. A seção convergente deve ter um ângulo em torno de 20° , entre a linha de centro do fluxo e a parede convergente, e a seção divergente um ângulo variando entre 5 a 7° , entre a linha de centro do fluxo e a parede divergente.

Já Delmée (1983) recomenda adotar para o cilindro de entrada um comprimento mínimo igual ao diâmetro da tubulação. A parte convergente deverá ser em tronco de cone com um ângulo de $21^\circ (\pm 1^\circ)$. O comprimento do cone convergente é aproximadamente 2,7 vezes a diferença entre o diâmetro da tubulação principal e o diâmetro da garganta. A garganta deverá ser cilíndrica com um diâmetro entre 0,40 e 0,75 do diâmetro principal e um comprimento mínimo igual ao diâmetro. O cone divergente deverá ter um ângulo compreendido entre 7 e 15° , pois quanto menor o ângulo, maior será a recuperação de pressão após a seção divergente.

De acordo com Paco (1993) também citado em Ibars (2004), o diâmetro da garganta deve estar compreendido entre 0,25 e 0,75 vezes o diâmetro da tubulação principal, sendo muito freqüente o dimensionamento com a relação 0,50. Segundo Netto *et al.* (1998), o diâmetro da garganta geralmente estará compreendido entre $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ do diâmetro da tubulação, sendo o medidor Venturi fabricado em dois tipos: longo (Hershel) e curto (Orivent). Os comprimentos dos tubos longos são geralmente compreendidos entre 5 e 12 vezes o diâmetro da tubulação e nos curtos é de 3,5 a 7 vezes o diâmetro.

Já de acordo com Botrel *et al.* (2001), citado em Ibars (2004), no medidor Venturi, o diâmetro de garganta é geralmente $\frac{1}{3}$ do diâmetro da tubulação principal. A seção convergente pode ter um comprimento de 2,5 vezes o diâmetro da tubulação, o qual corresponde a um ângulo de 15° e no divergente pode apresentar um comprimento de 7,5 vezes o diâmetro da tubulação, o que forma um ângulo de 5° . A tabela III-2 resume as dimensões e relações propostas para um tubo Venturi segundo as diversas fontes onde D é o diâmetro da tubulação de entrada.

Tabela III-2 – Resumo das dimensões e relações propostas para um tubo Venturi

Fonte	Ângulo convergente	Diâmetro da garganta	Ângulo divergente	Comprimento total
Leopoldo <i>et al.</i> (1979), e Losada (1988) citados em Ibars (2004)	20°	-	5 a 7°	-
Delmée (1983)	$21^\circ (\pm 1^\circ)$	(0,40 a 0,75).D	7 a 15°	-
Paco (1993) citado em Ibars (2004)	-	(0,25 a 0,75).D	-	-
Netto <i>et al.</i> , (1998) citado em Ibars (2004)	-	(0,25 a 0,75).D	-	(3,5 a 12,0).D
Botrel <i>et al.</i> , (2001) citado em Ibars (2004)	15°	0,33.D	5°	-

3.2.4. Equacionamento matemático de um Medidor Venturi

A partir do balanço global de energia, equação 3.1, também chamada de equação de Bernoulli (Tavares, 2002), onde os pontos 1 e 2 podem ser verificados na figura 3.6, foi desenvolvido o balanço energético, considerando o estado estacionário. O equacionamento matemático é demonstrado a seguir, assim como as considerações realizadas.

$$\frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + W_s + \text{perdas}_{1-2} \quad (3.1)$$

Onde:

- v_1, v_2 : velocidades médias do fluido nos pontos 1 e 2 respectivamente, em [m/s];
- z_1, z_2 : altura dos pontos 1 e 2 respectivamente, em [m];
- g : aceleração da gravidade, em [m/s²];
- p : pressão exercida pelo fluido, em [Pa]
- ρ : densidade do fluido, em [kg/m³];
- W_s : trabalho mecânico que o fluido realiza no sistema, em [J];
- perdas_{1-2} : perdas por fricção ao longo do Venturi, em [J].

Considerando que:

- o trabalho realizado pelo Venturi é zero ($W_s = 0$), uma vez que o sistema não possui um equipamento para manuseio do fluido;
- as perdas por atrito são desprezíveis ($\text{perdas}_{1-2} = 0$), uma vez que as mesmas só são significativas quando são utilizados dutos longos e o medidor Venturi, neste caso, possui aproximadamente 50 cm;
- a densidade do fluido é constante, uma vez que a queda de pressão observada no Venturi nas condições de operação do alto-forno é pequena, obtém-se a equação 3.2.

$$\frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (3.2)$$

Pela equação de continuidade tem-se:

$$v_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = v_2 \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (3.3)$$

Onde:

- d_1, d_2 : diâmetros da tubulação nos pontos 1 e 2, respectivamente, em [m].

Fazendo simplificações, pode-se escrever a equação de Bernoulli conforme a expressão 3.4, explicitando a velocidade v_2 :

$$v_2 = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta p}{\rho} + gh\right) \times 2}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad (3.4)$$

Onde:

- Δp : é a diferença entre as pressões ($p_1 - p_2$), em [Pa].

Multiplicando a equação 3.4 pela área no ponto 2, obtém-se a vazão volumétrica de ar que passa pela garganta do Venturi, em [m³/s], dado pela equação 3.5.

$$Q = A_2 \times \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta p}{\rho} + gh\right) \times 2}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad (3.5)$$

Onde:

- Q: vazão volumétrica de ar passando pela ventaneira, em [m³/s].

Apesar de considerar as perdas por atrito igual a zero, na realidade as mesmas não são. Existem efeitos viscosos (do fluido), inerciais (da geometria) e de atrito (da rugosidade do refratário) que precisam ser considerados por que farão com que a diferença de pressão medida seja maior que a calculada pela equação 3.5. Para se aplicar o valor obtido no equacionamento desenvolvido, torna-se necessária uma correção para se obter o valor real da vazão. A razão entre a vazão real e a vazão teórica será o coeficiente de descarga C_d determinado a partir do gráfico da figura 3.8, em função do número de Reynolds dado pela equação 3.6:

$$Re = \frac{d_1 \cdot v_1 \cdot \rho}{\mu} \quad (3.6)$$

Onde:

- μ : é a viscosidade do fluido.

Segundo Delmée (1983), a viscosidade absoluta do ar à pressão de 1bar e 1100°C de temperatura é $5 \cdot 10^{-5}$ Pa.s. Considera-se este valor por ser muito próximo as condições de operação do alto-forno A.

A expressão para a vazão real é obtida dessa forma pela equação 3.7.

$$Q_{\text{real}} = C_d \times Q \Rightarrow C_d \times A_2 \times \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta p}{\rho} + gh\right) \times 2}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad (3.7)$$

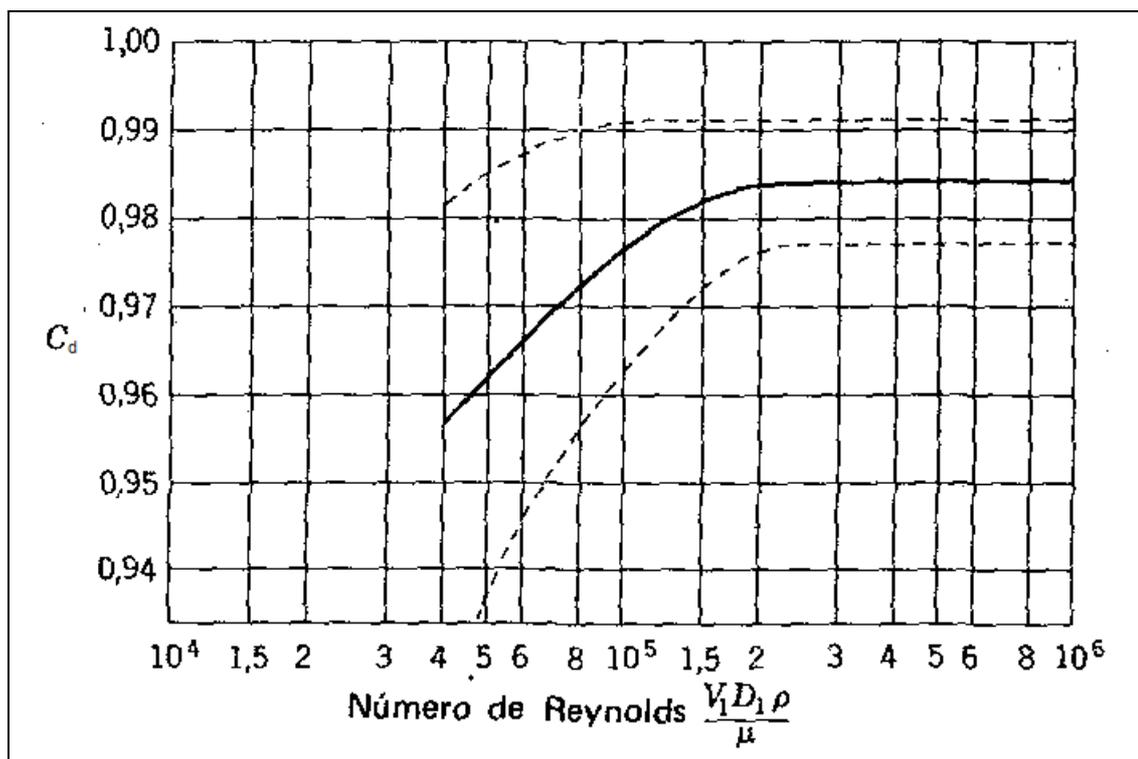


Figura 3.8 – Coeficientes de descarga C_d para medidores Venturi, ASME, (1955)

Em medições de fluxo de gás compressíveis, como é o caso do ar soprado no alto-forno, os efeitos de compressibilidade do gás podem mudar o coeficiente de descarga. O fator de expansão Y é a razão entre a vazão Q de um fluido compressível pela vazão Q_i , que é a vazão de um fluido incompressível. O valor do fator de expansão Y , depende de vários outros valores, dentre os quais pode-se destacar a queda de pressão relativa ao longo do Venturi dada por $\Delta p/p_1$. Como regra geral, os efeitos de compressibilidade tornam-se importantes quando $\Delta p/p_1 \geq 0,1$. No caso do sistema proposto, essa razão é menor que 0,1, portanto os efeitos de compressibilidade serão desprezados no equacionamento do Venturi proposto.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento de um sistema de medição da vazão de ar por ventaneira do alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade envolve o desenvolvimento das seguintes etapas, que serão descritas a seguir:

- Análise matemática de um Venturi no conjunto porta-vento;
- Análise das dimensões físicas do conjunto porta-vento;
- Teste em escala industrial;
- Identificação e eliminação de ruídos;
- Validação do teste em escala industrial;
- Automação do sistema.

4.1. Modelamento Matemático de um Venturi no Conjunto Porta-vento do AF-A

A tabela IV-1 apresenta algumas características principais do alto-forno A.

Tabela IV-1 - Principais dados de projeto do alto-forno A

Diâmetro do cadinho	8,0 m
Diâmetro da goela	6,4 m
Volume interno	1.357 m ³
Volume útil	1.186 m ³
Número de ventaneiras	22
Furo de gusa	1 (Canal principal removível)
Produção anual projetada	1.040.000 t
Produtividade por volume interno projetada	2,10 t/m ³ /24h
Topo	<i>Bell less top</i> , tipo <i>central feeding</i> , Paul Wurth.
Refrigeração	<i>Staves</i> de ferro fundido no cadinho; <i>Staves</i> de cobre na rampa e cuba inferior; <i>Staves</i> de ferro fundido na cuba superior.
	Quatro circuitos fechados com água desmineralizada: Cadinho, <i>Staves</i> superiores, Corpo de ventaneiras e Nariz de ventaneiras.
Regeneradores	Três, com câmara de combustão interna.
	Pré-aquecimento de ar e gás de combustão (<i>Thermal oil</i>) a partir de Setembro de 2005.
Sistema de limpeza de gases	Ciclone (a partir de junho de 2007, lavador de gás de fenda anular simples e <i>demister</i> externo.

A idéia inicial, de acordo com a revisão bibliográfica, foi implementar um medidor Venturi no conjunto porta-vento do alto-forno A. A figura 4.1 ilustra de forma esquemática a localização do estrangulamento proposto para o “down-leg”.

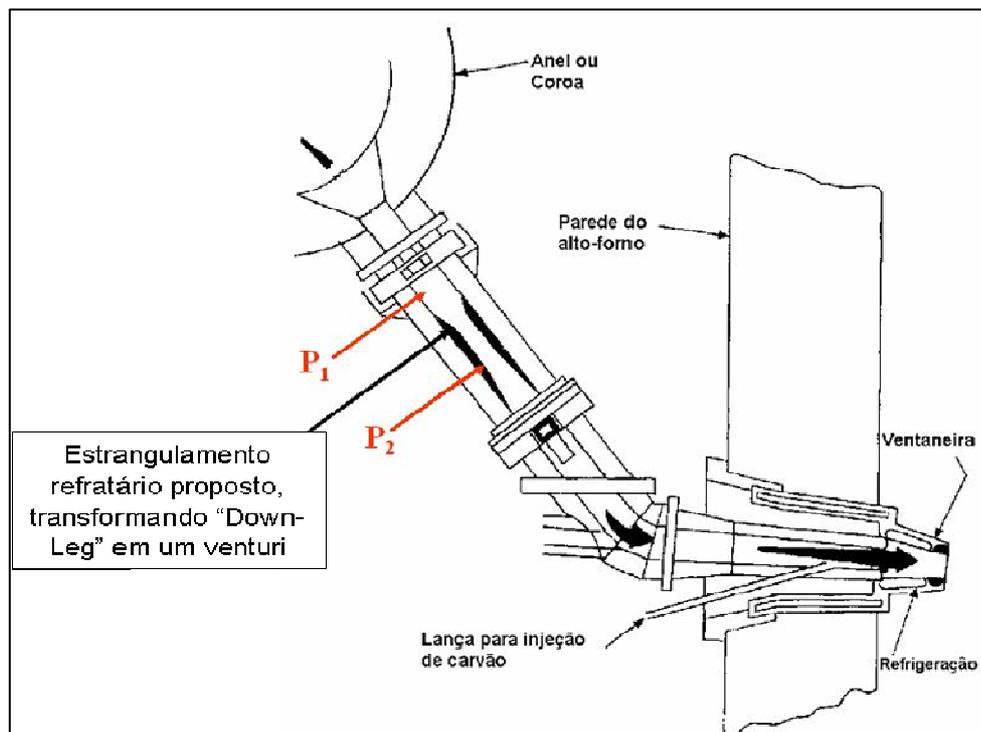


Figura 4.1 – Localização esquemática do estrangulamento proposto para o “down-leg” do alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade

Com o objetivo de certificar a viabilidade da medição de vazão de ar na ventaneira do alto-forno A a partir da equação matemática desenvolvida no capítulo anterior (equação 3.7), foram utilizados alguns valores para as variáveis bem próximas das condições reais de operação do alto-forno. Da mesma forma, foram propostos possíveis valores para os diâmetros do Venturi a serem implementados no “down-leg”, considerando as possíveis interferências mecânicas.

Considerando as seguintes condições hipotéticas:

- $\Delta p = 5000\text{Pa}$, onde $1\text{bar} = 10^5.\text{Pa}$ e quando $p_1 = 2,70\text{bar}$ e $p_{2(\text{simulado})} = 2,65\text{bar}$;

- $Re = 10^6$, considerando que v_1 tem a mesma ordem de grandeza que a velocidade de sopro na ventaneiras (VSV) $\sim 10^2$;
- $C_d = 0,985$, de acordo com o gráfico da figura 4.2 e com o número de Reynolds calculado;
- $\rho = 0,695\text{kg/m}^3$ (demonstrado a seguir);
- $d_1 = 0,200\text{m}$ e $d_2 = 0,160\text{m}$ (possíveis diâmetros do Venturi);
- $p_1 = 2,7 \text{ bar}$ ou $2,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

Considera-se que o efeito da gravidade é nulo por se tratar de gases e a diferença de altura entre os pontos 1 e 2 ser pequena. A densidade ρ pode ser calculada pela equação 4.1.

$$\rho = \frac{p_1 \times MM}{R \times T} \quad (4.1)$$

Onde:

- MM: é a massa molar do fluido, em [g/mol];
- R: é a constante dos gases, 0,082atm.l/k.mol;
- T: é a temperatura do fluido, em [K];

A MM do ar segundo Tavares (2002) é 28,97g/mol. A temperatura de sopro de trabalho no alto-forno A é 1100 °C ou 1373K. A pressão de sopro medida no “down-leg” é 2,70bar ou o equivalente a 2,70atm. Substituindo estes valores na expressão 4.1 e, esta por sua vez na expressão 3.7, espera-se a seguinte vazão de ar passando pela ventaneira do alto-forno, em m^3/s (equação 4.2):

$$Q = 0,985 \times \left(\frac{\pi \times d_2^2}{4} \right) \times \sqrt{\frac{2 \times \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4}}$$

$$Q = 0,985 \times \left(\frac{\pi \times (0,16)^2}{4} \right) \times \sqrt{\frac{2 \times \left(\frac{5000}{\left(\frac{2,7 \times 28,97}{0,082 \times 1373} \right)} \right)}{1 - \left(\frac{0,16}{0,20} \right)^4}} = 3,07 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.2)$$

A vazão de $3,07 \text{ m}^3/\text{s}$ é equivalente a $11.052 \text{ m}^3/\text{h}$.

Utilizando a lei dos gases ideais (equação 4.3), pode-se transformar a vazão obtida em m^3/h para Nm^3/h . Considerando que p_1 , V_1 , T_1 são as condições do ar na CNTP ($p_1 = 1 \text{ atm}$ e $T_1 = 273 \text{ K}$) tem-se o seguinte resultado para a vazão de ar na ventaneira (equação 4.4):

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (4.3)$$

Onde:

- $V \rightarrow$ é o volume do gás, em $[\text{m}^3]$;

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow \left(\frac{1 \times V_1}{273} \right) = \left(\frac{2,7 \times 11052}{1373} \right) \Rightarrow \text{vazão} = 5.933 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (4.4)$$

Este resultado aproxima-se do esperado. Como a vazão de ar soprado no alto-forno está em torno de $131.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ nas condições simuladas, dividindo-se por 22 ventaneiras, espera-se uma vazão média em cada ventaneira de $5.955 \text{ Nm}^3/\text{h}$. A equação desenvolvida e os diâmetros considerados para o Venturi parecem se adequar à situação do alto-forno A. Foi desconsiderado o volume de oxigênio do enriquecimento do sopro e o vapor de água injetado uma vez que o volume de ar soprado é sensivelmente superior ao do oxigênio e ao do vapor. Outro ponto que merece destaque é a respeito do erro de medição na pressão. Um erro de $0,1 \text{ mbar}$ na medição da diferença de pressão, Δp , pode levar a um erro de $4,5\%$ no valor da medição de vazão de ar em cada ventaneira.

4.2. Análise das dimensões físicas do conjunto porta-vento do AF-A

O dimensionamento do medidor Venturi baseou-se essencialmente nas tolerâncias sugeridas por Delmée (1983) e na norma internacional ISO 5167-4 (2003) de dimensionamento de tubos Venturi.

O desenho esquemático do revestimento refratário do “down-leg” do alto-forno A é mostrado na figura 4.2. Foram feitas modificações mínimas no perfil interno do refratário. Uma dificuldade encontrada foi o fato do “down-leg” do alto-forno A ser constituído de 3 partes mecânicas e por conseqüência três partes refratárias, unidas por duas juntas de dilatação. O objetivo dessas juntas é compensar a expansão térmica do conjunto, minimizando a ocorrências de trincas e vazamentos durante a operação. Praticamente todos os conjuntos porta-vento dos grandes alto-fornos possuem estes sistemas.

O estrangulamento proposto no modelamento matemático é uma redução do diâmetro do trecho reto de 200mm para 160mm, ou seja, β de 0,80. Apesar da norma ISO 5167-4 (2003) aconselhar $0,3 \leq \beta \leq 0,75$, utilizamos este β de 0,80 de forma a restringir menos a passagem do ar pelo “down-leg”. Qualquer perda de carga adicional na linha de ar quente pode levar a uma perda de produção de gusa. O alto-forno A da ArcelorMittal trabalha no limite da pressão de trabalho do turbo soprador, sendo necessário reduzir o “set-point” da vazão de sopro quando este limite é ultrapassado.

O comprimento do trecho reto antes do Venturi, de acordo com a ISO 5167-4 (2003), deve ser pelo menos igual ao diâmetro do trecho reto na entrada do Venturi, neste caso 200mm. Pode-se ver pela figura 4.2 que tal situação é atendida.

De acordo com Delmée (1983), o ângulo do cone convergente deve ser $21^\circ \pm 1^\circ$. Neste trabalho consideramos 20° . Da mesma forma para o cone divergente, Delmée (1983) sugere um valor entre 7 a 15° . Foi considerado no modelo proposto $11,4^\circ$. As equações 4.5 e 4.6 demonstram o cálculo das dimensões do cone convergente e do cone divergente, respectivamente. Vale destacar que a redução total do diâmetro é 40mm. As figuras 4.3 e 4.4 mostram em detalhe as relações matemáticas do cone convergente e do cone divergente, respectivamente.

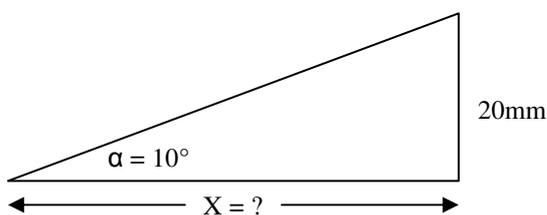


Figura 4.3 – Cone convergente do Venturi do “down-leg” alto-forno A

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}10^\circ = \frac{20}{X} \Rightarrow X = 113,4\text{mm} \quad (4.5)$$

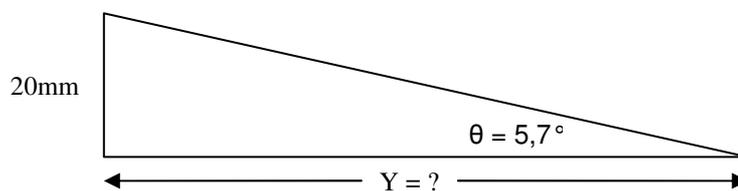


Figura 4.4 – Cone divergente do Venturi do “down-leg” alto-forno A

$$\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg}5,7^\circ = \frac{20}{Y} \Rightarrow Y = 200\text{mm} \quad (4.6)$$

Como as dimensões encontradas para o cone convergente e cone divergente atendem ao projeto atual do “down-leg” partiu-se para a confecção do molde para refratamento de um “down-leg” piloto para teste industrial. As figuras 4.5 e 4.6 mostram, respectivamente, as dimensões do macho e o mesmo após ser fabricado em isopor.

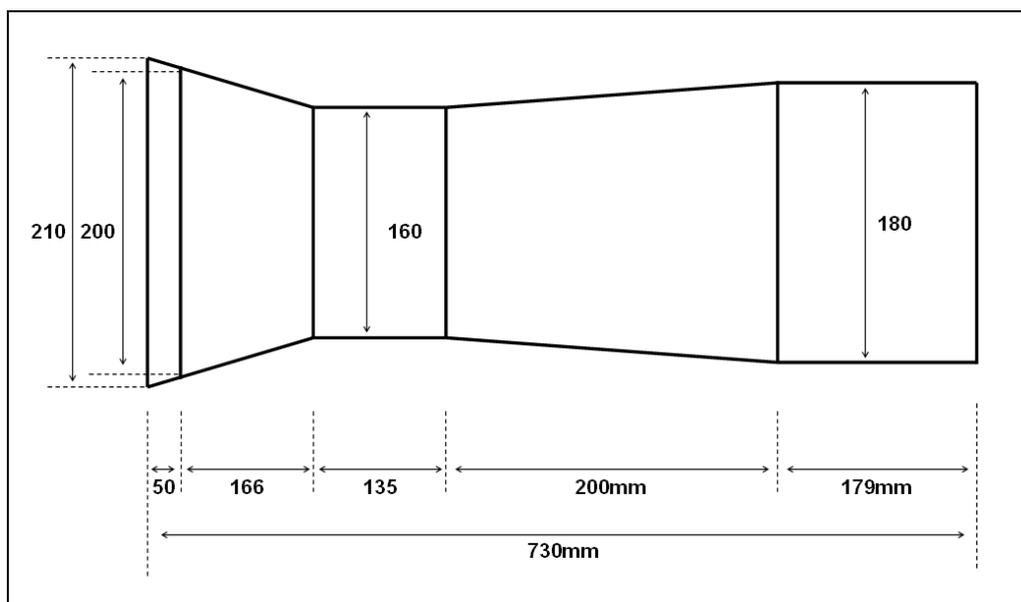


Figura 4.5 – Dimensões finais do Venturi do “down-leg” alto-forno A

De acordo com a ISO 5167-4 (2003), são necessários 4 pontos de tomadas de pressão, eqüidistantes em um mesmo plano no trecho reto antes do Venturi e 4 pontos de tomadas de pressão, eqüidistantes no pescoço do Venturi. As tomadas de pressão no trecho reto antes do Venturi devem ficar a uma distância de 0,5 diâmetro antes do início do cone convergente, ou seja, 100mm no caso deste Venturi.

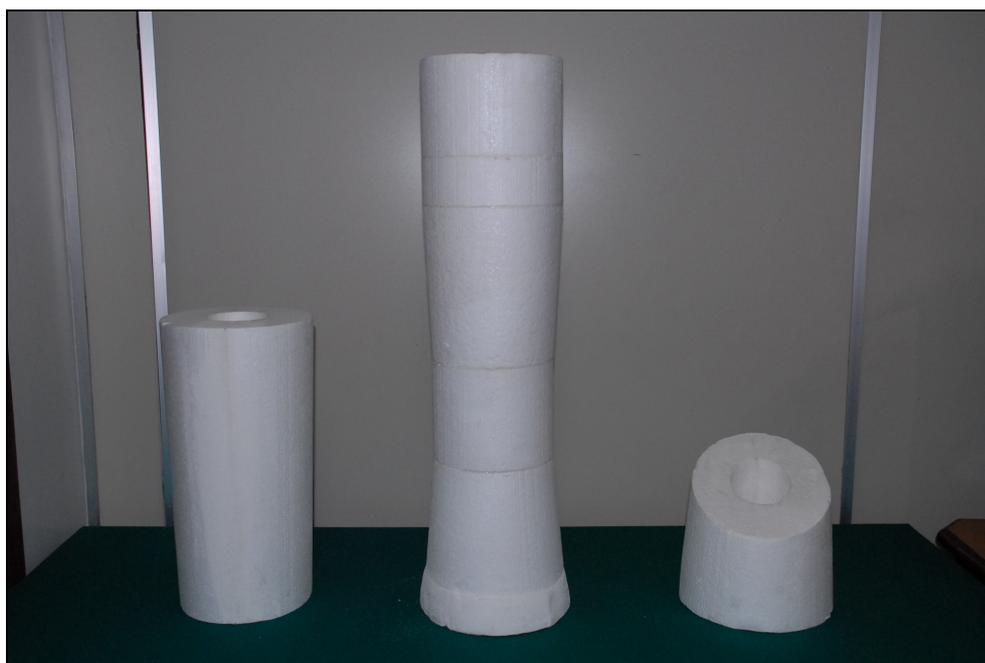


Figura 4.6 – Machos utilizados para o refratamento do Venturi do “down-leg” alto-forno A

Já o diâmetro das tomadas de pressão, segundo a ISO 5167-4 (2003), deve ter entre 4 e 10mm, no projeto proposto optou-se por 8mm para reduzir o risco de entupimentos. Outro fator que contribuiu para a escolha do diâmetro maior foi o fato de ser instalada apenas uma tomada de pressão em cada ponto. A opção por esta configuração deveu-se a necessidade de reduzir os custos do projeto com tubulações em inox, e simplificar a instalação. Os dados a seguir são do tubo utilizado na ligação das tomadas de pressão até o diferencial de pressão.

- Diâmetro externo: 12,00mm;
- Espessura da parede: 2,00mm;
- Material: aço inox AISI-304 (trefilado, sem costura, acabamento decapado);

Para o cálculo do diferencial de pressão foi adquirido no mercado um equipamento específico para tal função. Os dados técnicos são mostrados a seguir e a figura 4.7 mostra o modelo do medidor de diferença de pressão empregado:

- Modelo: Transmissor de pressão diferencial;
- Alimentação: 10,5 a 55VCC;
- Faixa de medição: -250 a 250 "H₂O / 2,5"H₂O;
- Sinal de saída: 4 ~ 20mA;
- Especificação: com válvula manifold coplanar;



Figura 4.7 – Medidor de diferença de pressão empregado no Venturi do “down-leg” alto-forno A

A figura 4.8 mostra a malha de controle automático implementada para a medição das variáveis no campo:

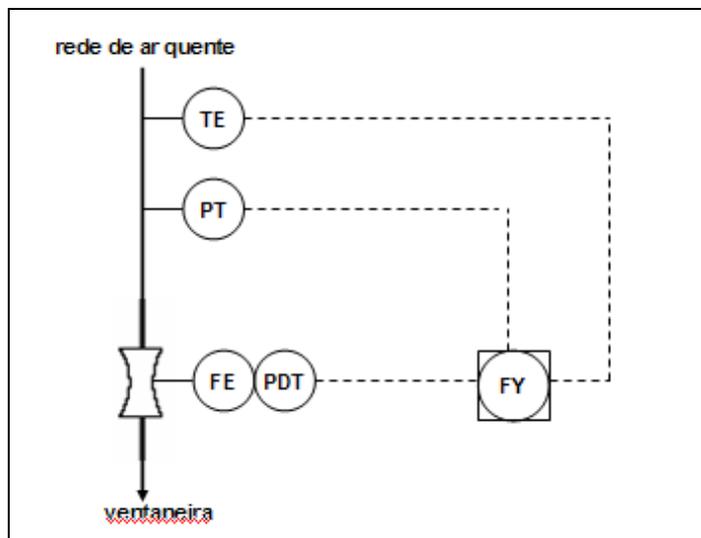


Figura 4.8 – Malha de controle automático implementada para a medição de vazão de ar na ventaneira do alto-forno A

Nesta figura tem-se:

- FE: tubo Venturi (confeccionado no “down-leg”);
- PDT: transmissor de pressão diferencial;
- PT: transmissor de pressão (instalado no anel de vento);
- TE: termopar (instalado no anel de vento);
- FY: computador de vazão;

As figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram em seqüência, respectivamente, um “down-leg” com um Venturi adaptado onde pode-se notar as duas tomadas de pressão, um “down-leg” comum em operação (com uma tomada de pressão e um termopar em cada lado) e um “down-leg” com Venturi em operação na ventaneira 14.

Vale destacar que o projeto inicial do alto-forno A previa a instalação de uma tomada de pressão e de um termopar em cada “down-leg” e no anel de vento. O objetivo de ter estas informações separadas para cada “down-leg” era possibilitar o monitoramento de uma possível obstrução interna, por exemplo, devido a retorno de escória. Vale destacar que, durante os primeiros anos de operação, foi verificada a dificuldade em

se afirmar com certeza que este tipo de problema acontecia, baseado somente no valor da pressão e da temperatura. Além disso, a vida útil dos termopares de platina utilizados nos “down-legs” era muito curta, acarretando um alto custo de manutenção.

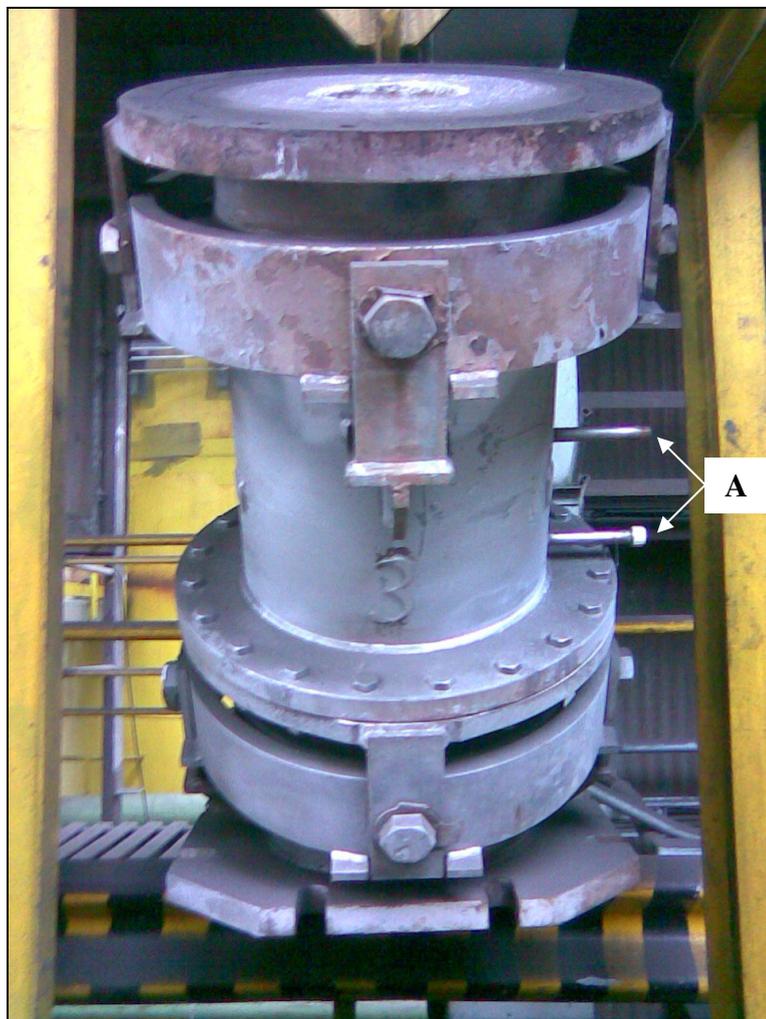


Figura 4.9 – “Down-leg” com Venturi adaptado pronto para ser utilizado no alto-forno A.

Nesta figura tem-se:

- A: tomadas de pressão do medidor Venturi.

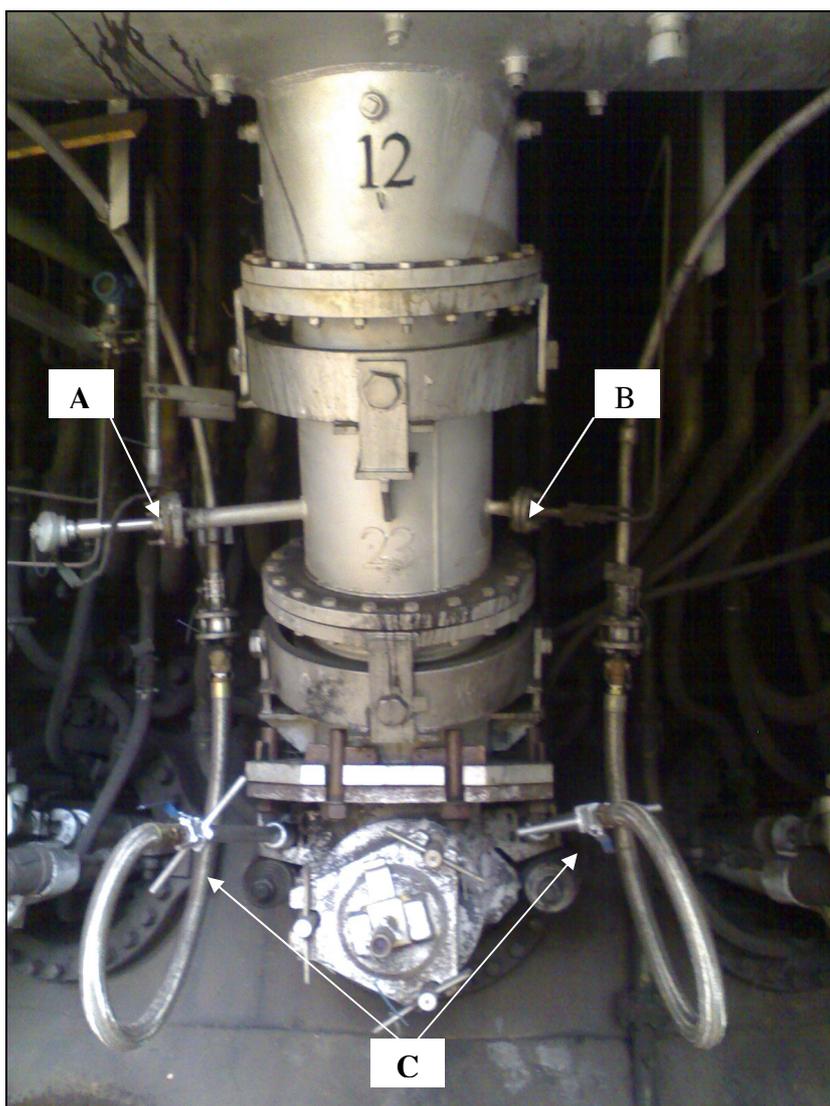


Figura 4.10 – “Down-leg” original em operação no alto-forno A.

Nesta figura tem-se:

- A: termopar instalado no “down-leg” original;
- B: tomada de pressão instalada no “down-leg” original;
- C: lanças de injeção de carvão pulverizado.

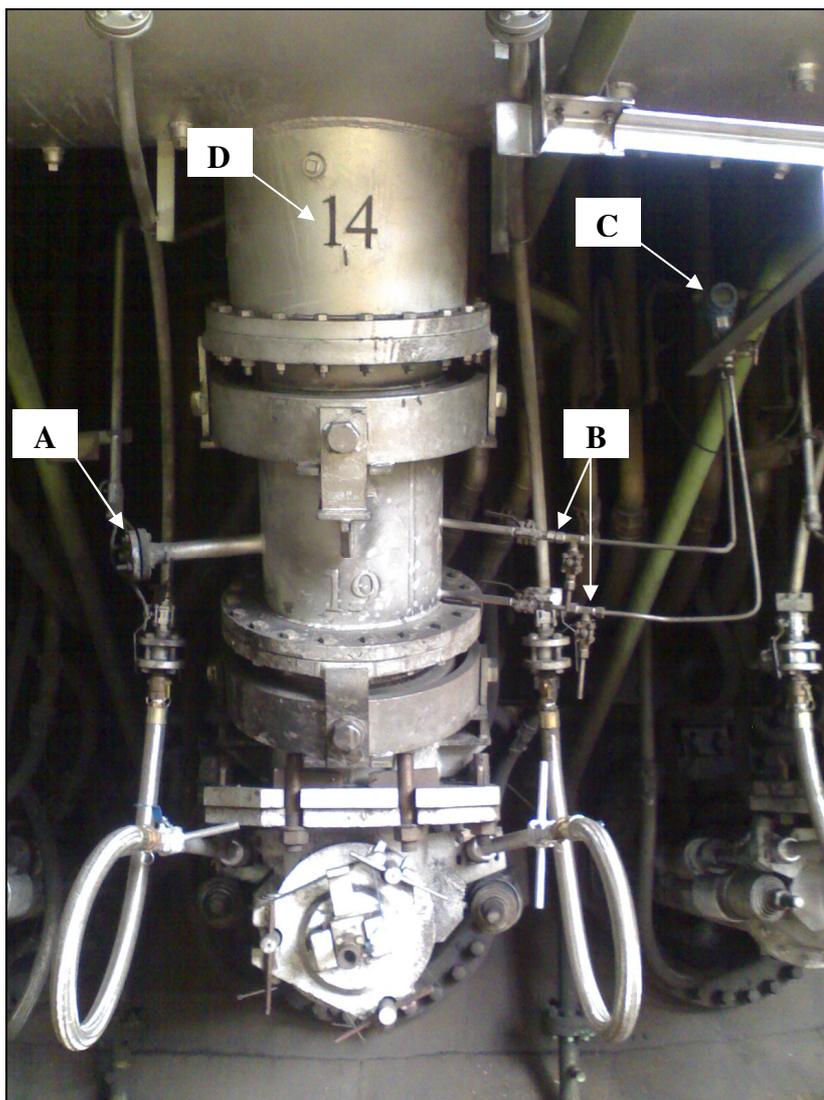


Figura 4.11 – “Down-leg” com Venturi adaptado em operação na ventaneira 14 no alto-forno A

Nesta figura tem-se:

- A: entrada do termopar flangeada no “down-leg” original;
- B: tomadas de pressão do medidor Venturi;
- C: medidor de diferença de pressão;
- D: número da ventaneira.

4.3. Teste em Escala Industrial

O teste em escala industrial foi realizado em janeiro de 2007. Durante uma parada programada de 12 horas do alto-forno A para troca do canal principal e manutenção mecânica, foi instalado o “down-leg” Venturi para teste e verificação dos resultados na ventaneira 14. A interligação do sistema de instrumentação foi realizada nos dias seguintes. O período de avaliação durou dois meses, ao final do qual, decidiu-se pela instalação de mais dois “down-legs” com Venturi, dessa vez nas ventaneiras 6 e 21.

4.3.1. Eliminação de ruídos e automação do sistema

O principal ruído identificado durante os primeiros dois meses de teste foi a condensação de vapor de água na tubulação das tomadas de pressão. Esta condensação acabava por interferir na medição do diferencial de pressão que por sua vez afetava a medição de vazão. Tal comportamento era esperado, uma vez que é comum este tipo de problema em redes industriais onde se tem a presença de vapor, como é o caso da linha de ar quente do alto-forno.

Para permitir a purga da linha durante a operação do alto-forno e com isso evitar uma medição incorreta foi instalado um sistema de purga logo após da saída das tomadas de pressão. O sistema de purga é constituído basicamente de uma válvula esfera para isolamento do “down-leg”. Os dados da válvula esfera são mostrados a seguir assim como o detalhe do sistema de purga montado na ventaneira 14 (figura 4.12).

- Válvula esfera tipo: BL 301;
- Diâmetro: 1/2”;
- Rosca: 1/2” BSP;
- Material: corpo de aço carbono, eixo e esfera de aço inox;

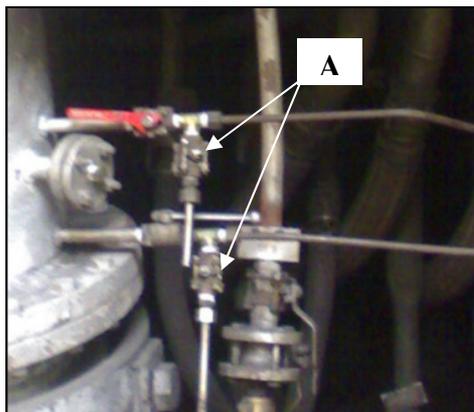


Figura 4.12 – Sistema de purga instalado no “down-leg” da ventaneira 14 no alto-forno A

Nesta figura tem-se:

- A: sistema de purga instalado nas duas tomadas de pressão;

Visando automatizar a medição de vazão, foi implementada no supervisório do alto-forno A, a fórmula de cálculo da vazão de ar por ventaneira demonstrada na equação 4.2 e sua conversão para a CNTP dada pela equação 4.4. A malha de controle ilustrada na figura 4.8 mostra as variáveis medidas no campo. Esta automatização permitiu um acompanhamento contínuo da vazão e com isso a identificação de possíveis anomalias no comportamento do sistema desenvolvido.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 5.1 mostra os resultados iniciais do cálculo de vazão de ar soprado na ventaneira 14 durante o período de testes iniciais. A vazão calculada variou entre 5.000 e 5.700Nm³/h no período analisado, bem próximo do esperado pela simulação matemática.

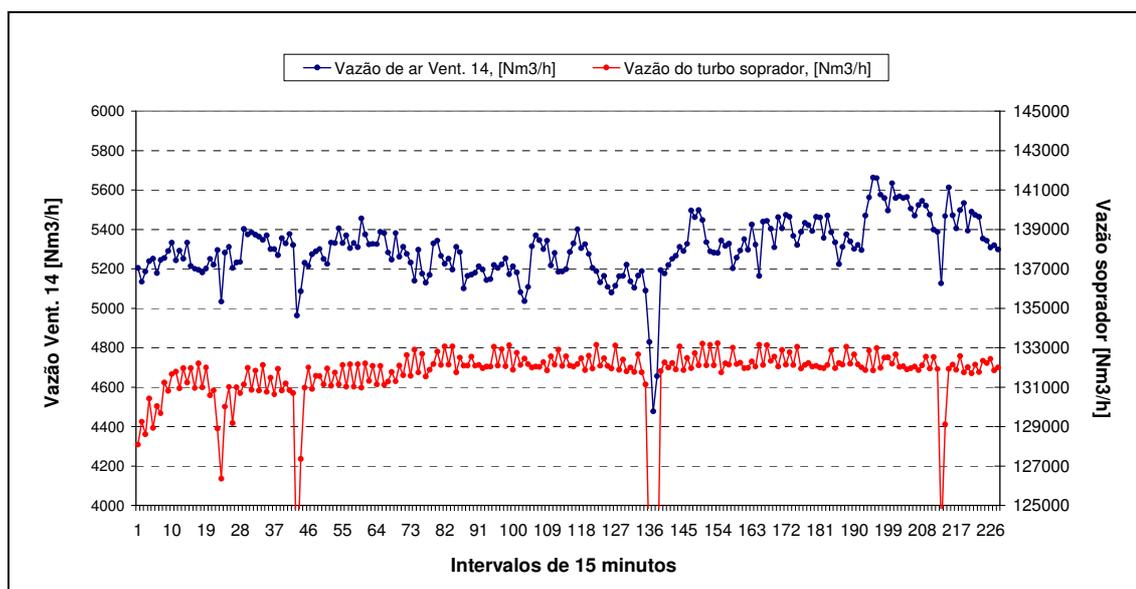


Figura 5.1 – Vazão de ar calculada na ventaneira 14 no alto-forno A em fevereiro de 2007.

Percebe-se uma boa estabilidade nos resultados encontrados ao longo de todo o período, porém com pequena variação nos valores entre curtos períodos. Este comportamento leva a crer que a vazão de ar pode realmente variar ao longo do perímetro do forno, como comentado por Bolsigner (2003), uma vez que a vazão total soprada pelo turbo soprador apresenta-se mais estável que a vazão na ventaneira 14.

O gráfico da figura 5.2 mostra a correlação entre a vazão de ar calculada na ventaneira 14 e a vazão de ar total do soprador, durante reduções de vazões de sopro no alto-forno. Pode-se perceber uma excelente correlação entre a vazão de ar do soprador e a vazão medida na ventaneira 14, $R^2 = 0,98$. Ou seja, mesmo em baixas vazões de ar soprado, o medidor Venturi desenvolvido apresenta um comportamento confiável.

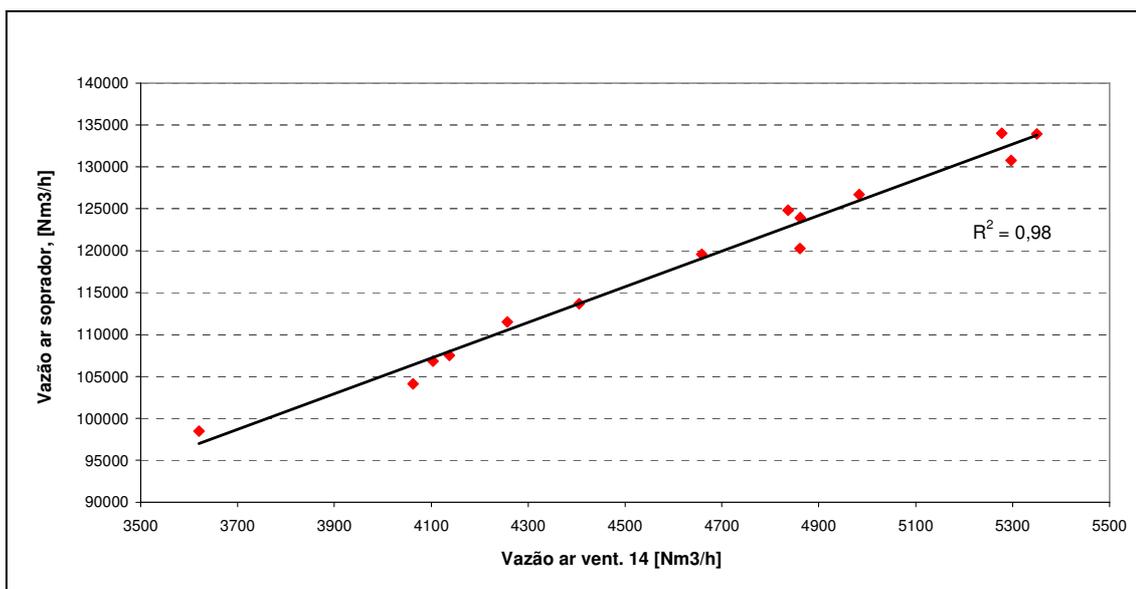


Figura 5.2 – Correlação entre a vazão de ar calculada na ventaneira 14 e a vazão total de ar do soprador durante reduções de vazões no alto-forno A em fevereiro de 2007

Diante dos resultados verificados, concluiu-se que o Venturi desenvolvido pode, a princípio, ser utilizado no monitoramento da vazão de ar por ventaneira do alto-forno A. Para verificar a repetibilidade do processo, foi decidido pela instalação de novos “down-legs” com Venturis nas ventaneiras 6 e 21. A figura 5.3 mostra os resultados obtidos, após implantação nas paradas programadas de março e de abril de 2007.

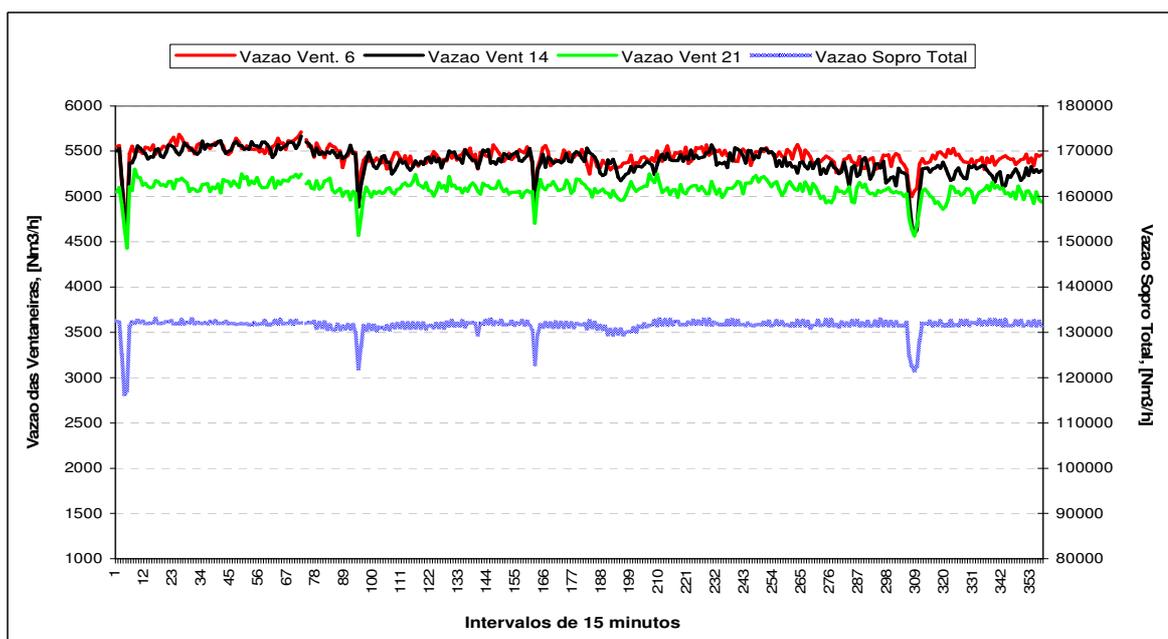


Figura 5.3 – Vazões de ar calculadas nas ventaneiras 6, 14 e 21 do alto-forno A durante 5 dias.

Percebe-se que as vazões calculadas nas ventaneiras 6 e 21 apresentam comportamento bastante similar aos valores encontrados na ventaneira 14, inclusive nos momentos de redução de vazão de sopro. Com este resultado pode-se concluir que o processo proposto de confecção do Venturi no “down-leg” atende ao esperado.

A figura 5.4 ilustra a variação da vazão de ar nas ventaneiras 6, 14 e 21 ao longo de 3 horas de operação. Percebe-se vazões mais estáveis nas ventaneira 6 e 21 neste período ao contrário da ventaneira 14. Essa variação pode-se dever a diversos fatores, por exemplo, quando houver a formação de carga inativa (cascão) sobre uma determinada ventaneira espera-se que o fluxo gasoso nessa região seja comprometido temporariamente. Vale destacar que a quantidade de carvão injetada em cada uma dessas ventaneiras é igual, ou pelo menos espera-se que seja, pelo projeto atual. Com isso, é de se esperar uma sobrecarga de carvão na ventaneira 21, que possui uma vazão média mais baixa. O efeito esperado é uma temperatura de chama mais baixa nesta região, que pode levar a uma elevação da raiz da zona coesiva dentro do alto-forno e com isso perturbar o fluxo gasoso. Por outro lado, na ventaneira 14 que parece possuir a maior vazão média, espera-se uma produção de gusa maior nesta região, e em decorrência disso, um possível desgaste localizado no cadinho. Ambos efeitos poderão ser melhor verificados quando todas as 22 ventaneiras possuírem o sistema de medição de vazão.

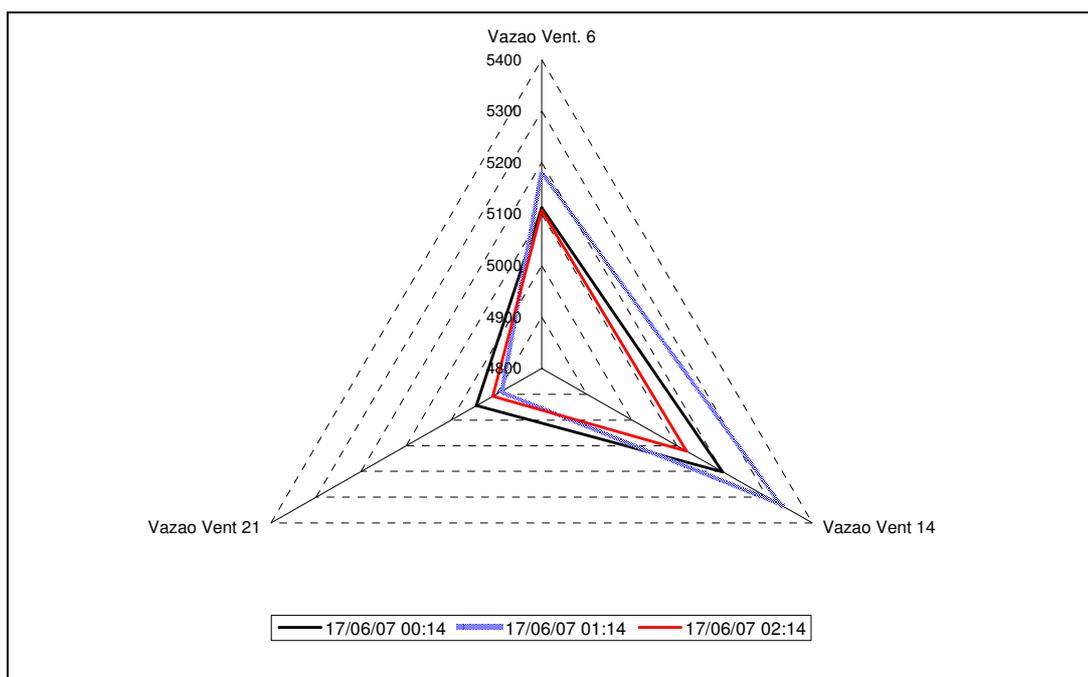


Figura 5.4 – Vazões horárias de ar nas ventaneiras 6, 14 e 21 do alto-forno A durante 3 horas.

A figura 5.5 mostra a tela do supervisor do alto-forno A desenvolvida para o monitoramento contínuo da vazão de ar nas ventaneiras com medidor Venturi. No futuro espera-se fazer um totalizador de vazão para cada um dos quatro quadrantes do alto-forno e com isso correlacionar com picos de temperaturas de staves, picos de perda térmica, assim como elevações localizadas de temperatura dos blocos de carbono do cadinho.

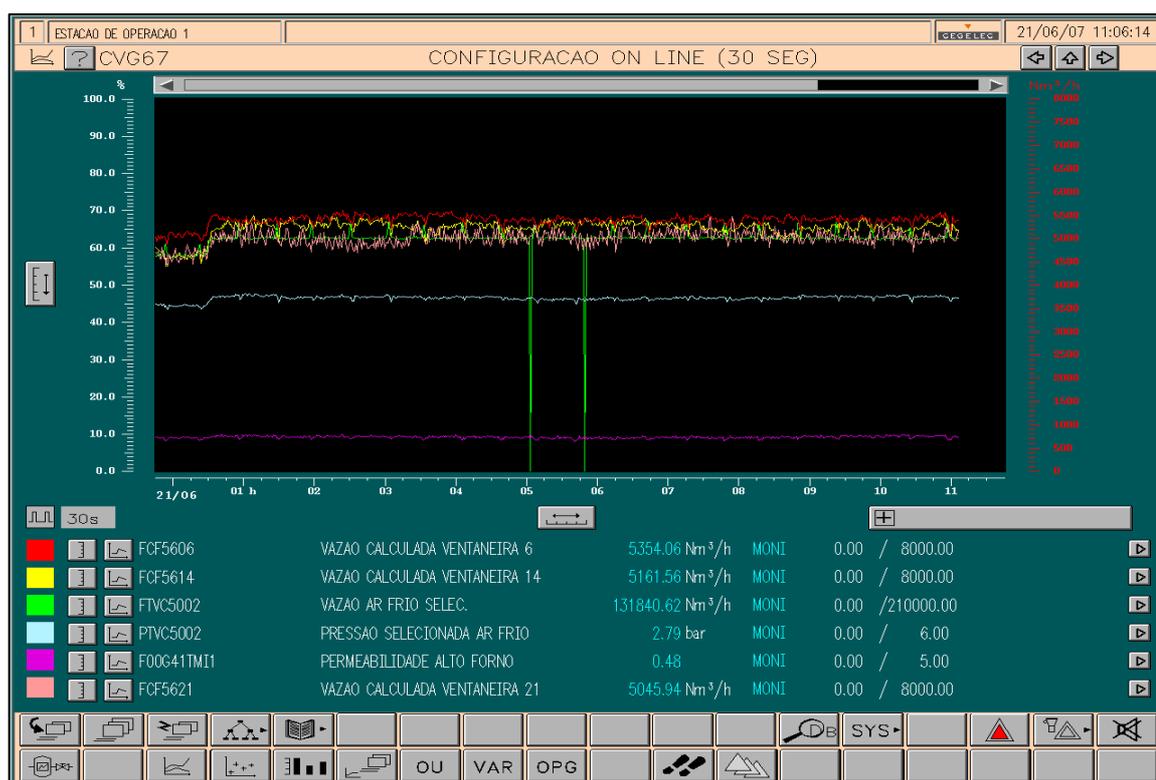


Figura 5.5 – Tela do sistema supervisor do alto-forno com as vazões de ar calculadas nas ventaneiras 6, 14 e 21

Outro importante resultado aferido com o sistema implantado foi referente ao aumento da confiabilidade da indicação de possível obstrução, total ou parcial, do conjunto porta-vento. Como comentado anteriormente, utilizava-se até este momento, a indicação de pressão e temperatura no “down-leg” para inferir sobre uma possível obstrução do conjunto porta-vento, seja por retorno de material de dentro do alto-forno ou por escoamento de material de dentro do conduto circular. Durante uma parada programada em 2007 para troca do canal principal, foi decidido remover o algaraviz da ventaneira 14. Sua vazão de ar apresentara queda significativa dias antes. As figuras 5.6 e 5.7 mostram, respectivamente, um “down-leg” limpo e a obstrução encontrada na saída do conduto circular para a ventaneira 14.

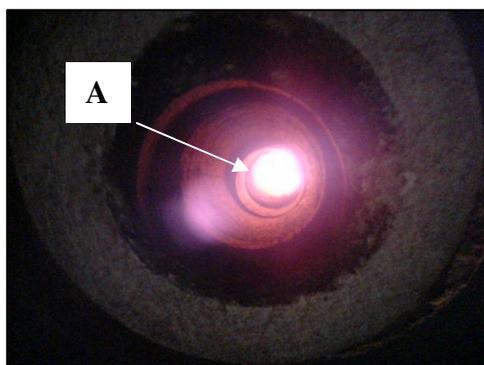


Figura 5.6 – Vista de baixo para cima de um “down-leg” para o conduto circular do alto-forno A

Na figura 5.6 tem-se:

- A: luminosidade emitida pelo revestimento refratário do anel de vento incandescente;

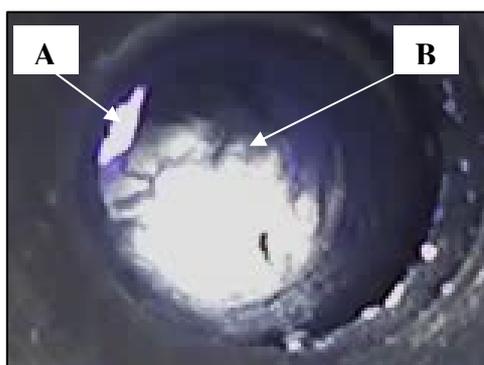


Figura 5.7 – Vista de material obstruindo parcialmente a saída do conduto circular para o “down-leg” da ventaneira 14 em maio de 2007 (no alto à esquerda, vista do conduto circular)

Na figura 5.7 tem-se:

- A: luminosidade emitida pelo refratário incandescente do anel de vento;
- B: material obstruindo em mais de 95% a saída do “down-leg” para o anel de vento;

Antes da implantação desse sistema de medição de vazão, as únicas informações disponíveis para identificação desse tipo de obstrução eram a temperatura e a pressão de ar no “down-leg”. Porém, quase sempre essas duas informações não traduziam corretamente o problema operacional.

Além dos ganhos intangíveis com o desenvolvimento desse sistema de medição de vazão de ar por ventaneira do alto-forno A da ArcelorMittal Monlevade, espera-se apurar um ganho financeiro decorrente da redução de gastos com compra de termopares de platina que se queimam em uso. O ganho esperado com a economia de termopares poderá chegar a R\$ 200.000,00 por ano ao final do projeto, uma vez que em 2006 foram adquiridos 80 termopares novos para substituição a um custo de R\$ 2.500,00 cada devido a baixa vida útil do mesmo. O custo de implantação deste sistema de medição de vazão de ar em cada “down-leg” gira em torno de R\$ 10.000,00, englobando tanto a parte de adaptação do “down-leg” com a compra e instalação dos instrumentos de medição. Devido a longa expectativa de campanha de cada “down-leg”, superior a 4 anos, espera-se que todas as ventaneiras estejam com este sistema instalado ao final de 2011. Outro relevante ganho apurado com este projeto, foi a possibilidade de identificar um déficit na curva de compensação de ar do turbo soprador durante manobra dos regeneradores, até então não evidenciada por nenhuma variável operacional. A figura 5.81 ilustra o déficit de vazão verificado.

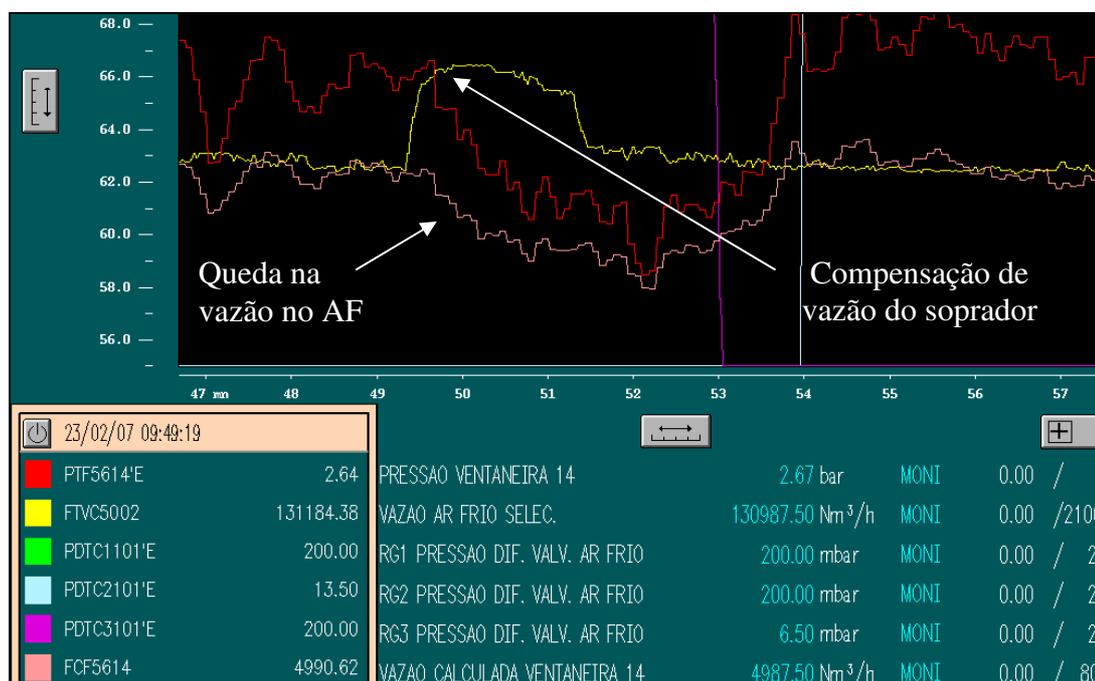


Figura 5.8 – Queda na vazão de ar no alto-forno durante manobra de regeneradores do AF-A

Estima-se que a otimização da curva de vazão do soprador de forma a reduzir esta queda de vazão durante a manobra tenha um potencial de elevar em até 3.000t de gusa por ano a produção do alto-forno, uma vez que o alto-forno A opera sempre na vazão máxima do turbo soprador.

6. CONCLUSÕES

Da revisão bibliográfica conclui-se que o medidor Venturi é o dispositivo mais apropriado para medir a vazão de ar na ventaneira do alto-forno, por provocar menor perda de carga no sistema. Com o desenvolvimento matemático e após análise das dimensões mecânicas do “down-leg” do alto-forno A, pode-se verificar que a adaptação do “down-leg” era viável tecnicamente. Após teste industrial pode-se concluir que o sistema desenvolvido para medir a vazão de ar em cada ventaneira no alto-forno A mostrou-se confiável, de fácil implementação e baixo custo além de trazer ganhos tais como redução no gasto financeiro com troca de termopares dos “down-legs”. A implantação desse sistema de monitoramento em todas as 22 ventaneiras do alto-forno A, previsto para final de 2011, viabilizará conhecer a partição das vazões em cada quadrante do alto-forno, inferir sobre desgaste localizado no cadinho, formação de cargas inativas dentre outras correlações.

Como sugestão para trabalhos futuros a implantação de um sistema de controle das vazões e da quantidade de carvão injetado em cada ventaneira poderá permitir que o alto-forno A opere com uma mesma razão “ar soprado/carvão injetado” em cada ventaneira e com isso se consiga reduzir o consumo de combustíveis a partir de uma melhora no fluxo gasoso dentro do alto-forno.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ISO 5167-1; Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular, Parte 1: Princípios e requisitos gerais, 2008. 33p.

BOLSIGNER, J. P., BAILLY, J. L., ALVAREZ, M.; Tuyere blast flow rate measurements on Sollac Atlantique BF04, ARCELOR Research, 2003, 23p.

DELMÉE, G. J.; Manual de Medição de Vazão. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 476p.

FIGLIOLA, R. S., BEASLEY, D. E.; Theory and Design for Mechanical Measurements. Third Edition. United States of America: John Wiley & Sons Inc. Chapter 10, Flow Measurements, p 394-405.

GASKELL, D. R.; An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering, Macmillan Publishing Company, 1992, 637p.

GEIGER, G. H.; POIRIER, D. R. ; Transport Phenomena in Metallurgy. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1980, 616p.

IBARS, R. A. F.; Desenvolvimento e Avaliação de Tubos Venturi para Medição de Vazão. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004, 61p. (Dissertação, mestrado em Irrigação e Drenagem).

INTERNATIONAL STANDARD, Switzerland. ISO 5167-4; Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, Part 4: Venturi tubes, 2003. 24p.

SANTOS, R. J.; TAVARES, R. P. Controle das temperaturas dos blocos de carbono do alto-forno, através de seu sistema de refrigeração, visando o prolongamento de Campanha. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005, 95p. (Dissertação, mestrado em Metalurgia Extrativa).

TAVARES, R. P.; Apostila de Fenômenos de Transporte, UFMG, 2002.

WEISER, R., BRAUNE, I., MATTHES, P.; Control Blast Furnace Pulverized Coal Injection to Increase PCI Rates, Germany, AMEPA GmbH, 2000. 9p.