

TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO NA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE GÁS DE ALTO FORNO*

Thiago dos Santos Durães¹
Elano Pereira Lopes²
Rodrigo Marcelino Guilherme³

Resumo

Consiste em apresentar o trabalho realizado de Substituição de Medidor de Vazão Pitot de Média por Tecnologia Ultrassônica *Tempo de Trânsito* na Medição de Vazão de Gás de Alto Forno, sua performance de funcionamento e principais vantagens de utilização na medição de vazão deste Gás Siderúrgico.

Palavras-chave: Ultrassônico; Pitot de média; Tempo de trânsito; Gás de alto forno.

ULTRASONIC TECHNOLOGY FOR TRANSIT TIME IN BLAST FURNACE GAS FLOW MEASUREMENT

Abstract

Is to present the work of Average Pitot Flow Meter Replacement for Technology Ultrasonic Transit Time in Blast Furnace Gas Flow Measurement, its operating performance and main advantages of using the flow measurement of this steel gas.

Keywords: Ultrasonic; Average pitot; Transit time; Blast furnace gas.

¹ Pós-Graduação *Latu Sensu* em Engenharia de Instrumentação Industrial – IBP Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Engenheiro de Instrumentação, Termelétrica, Thyssenkupp CSA Companhia Siderúrgica do Atlântico, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil; thiago.duraes@thyssenkrupp.com.

² Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, Engenheiro, Engenheiro Manutenção Elétrico, Manutenção Central, Thyssenkupp CSA Companhia Siderúrgica do Atlântico, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil; elano.lopes@thyssenkrupp.com.

³ Técnico de Eletromecânica, Técnico, Técnico de Instrumentação, Utilidades, Thyssenkupp CSA Companhia Siderúrgica do Atlântico, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil; rodrigo.guilherme@thyssenkrupp.com.

1 INTRODUÇÃO

Gerir o uso das águas da natureza foi o que motivou a necessidade de medir velocidades de escoamento dos rios e, mais tarde, a vazão.

A velocidade dos rios foi medida inicialmente com pequenas bolas flutuantes, pelo tempo levado para percorrer um trecho de comprimento determinado. No século XVI, Leonardo da Vinci, reuniu seus estudos sobre as águas na sua obra “hidráulica”, onde descreveu observações sobre a velocidade dos rios e estabeleceu as bases do princípio que, mais tarde, passaria a ser chamado o teorema da continuidade: a vazão é o produto da velocidade pela área [1].

Os medidores de vazão são fundamentais estratégica e economicamente nos processos industriais, pois, são utilizados para o controle do processo, análise e garantia de qualidade, produtividade; segurança; análise de eficiência, perdas e rendimento; balanço de massa, balanço de energia; transações comerciais, medições contábeis, etc.

É notável a importância da medição de vazão no âmbito operacional, comercial, e econômico, pois, esta torna prática a interpretação do quanto em dinheiro convertido em fluido está literalmente “correndo”, ou melhor, escoando.

Neste contexto, a escolha, especificação e compra de um medidor de vazão para atendimento de uma determinada aplicação é uma tarefa cada vez mais difícil uma vez que existe uma grande variedade de tipos de medidores de vazão disponíveis no mercado – o que é um fator paralelamente positivo e negativo, e, cada tecnologia disponível resolve alguns problemas, mas, acaba criando mais algumas dúvidas na hora de realizar estas tarefas devido ao volume de questões técnicas e comerciais envolvidas.

A disponibilidade de soluções em medidores de vazão é bem ampla, e a opção por um ou outro medidor tem que levar em consideração suas características técnicas (tecnologia, princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens, limitações, restrições, particularidades, recursos disponíveis, etc.). Somado a isso, surge à necessidade do conhecimento e habilidade no tratamento de leis físicas e conceitos científicos. Conhecer os requisitos e condições físicas operacionais do processo; exigências normativas e de confiabilidade; requisitos de segurança; custo de aquisição, instalação e manutenção, etc., são alguns dos parâmetros principais que complicam a tarefa de escolha do medidor mais adequado.

Estes itens devem ser criteriosamente analisados para que de fato o medidor seja escolhido em detrimento da aplicação confrontando a famosa relação “custos x benefícios” [2].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição do Processo

O gás de Alto Forno (BFG) é obtido no processo da redução do minério de ferro em metal líquido (gusa), pois além da produção de gusa e geração de escória, resultante deste processo, é gerado o gás de Alto Forno, que por ter em sua composição alto teor de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) é utilizado como fonte de geração de energia (gás combustível). Em média para cada 1.000kg de gusa produzido gera-se aproximadamente 1.600 a 1.700Nm³ de gás de Alto Forno.

O sistema do gás de Alto Forno (BFG) na área da Estação de Armazenamento (Gasômetro) e Misturadoras do Gás (Mixing Stations – GM1, GM3) estará recebendo o BFG da rede principal comum e será distribuído por uma rede de trabalho para distribuir aos vários consumidores (Figura 1). Todo sistema será constituído após a rede de saída do gasômetro de BFG para a compensação de desequilíbrios entre a fonte de BFG e os consumidores, existindo ainda instalações de queima (chamados Flares C34-1 e C34-2), onde o gás excedente pode ser queimado.

O resultado do balanço entre a produção do BFG e o gás consumido pela Mix Gas e Substitute Gas é que será usado na Termelétrica (Power Plant). Os desequilíbrios de curto tempo são absorvidos pelo gasômetro C31 de BFG. Um desequilíbrio com tempo mais longo tem ser absorvido queimando-se o gás através dos dois Flares C34-1 e C34-2 ou reduzindo-se ou aumentando-se o uso de BFG na Termelétrica (Power Plant), sendo que o gasômetro C31 de BFG que está conectado ao sistema de gás, serve também como um amortecedor para flutuações da pressão no sistema de BFG. Com o gasômetro desconectado do sistema, a pressão pode variar em uma escala mais larga. A pressão será limitada pelo controle de pressão dos Flares ou pela abertura de segurança das válvulas borboletas dos Flares.

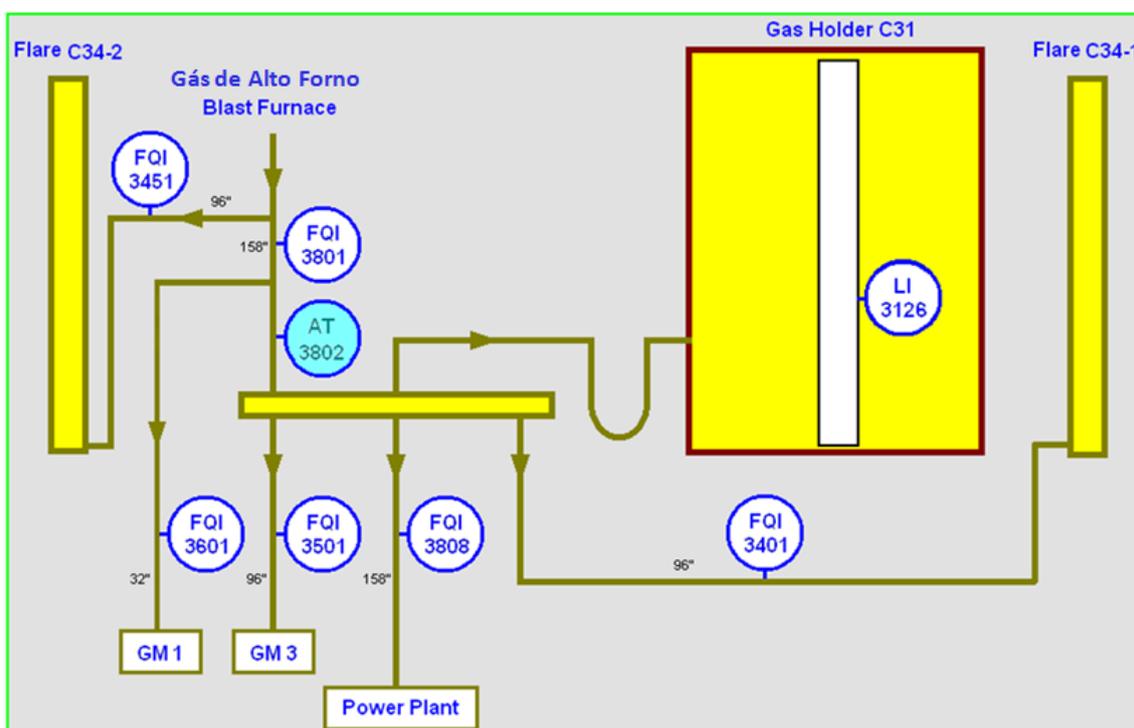


Figura 1. Balanço de Gás de Alto Forno no Sistema de Gases.

O fluxo de BFG para o gasômetro é uma resultante da pressão na rede principal de gás. O gasômetro de BFG estando com uma pressão constante, ocorrerá o fluxo para fora do gasômetro assim que uma pressão mais baixa resultante da rede principal de gás. Em uma pressão mais elevada resultante da rede principal ocorre o fluxo para o gasômetro. O gasômetro pode ser desconectado da rede principal de gás por uma válvula borboleta hidráulica (ON/OFF).

O fluxo de BFG para a estação misturadora (Mix Gas Station) é controlado pela demanda dos consumidores (principalmente pelos Regeneradores dos Altos Fornos). No momento da partida e parada dos Altos Fornos, a produção de BFG vai paralelamente sendo usada na estação de Mix Gas.

Da produção total de BFG, aproximadamente 1/3 é usado para a produção do Mix Gas.

O fluxo de BFG para a estação de gás substituto é regulado pelo controle de fluxo de acordo com a demanda de consumidores. Sob circunstâncias normais de operação o BFG não deve ser usado para a produção do gás substituto.

O fluxo de BFG para a Termelétrica é baseado no balanço médio da produção do BFG e no consumo do BFG para a Mix Gas, que é refletido no nível do gasômetro de BFG. O consumo de BFG na Termelétrica e conseqüentemente o nível do gasômetro de BFG será controlado pela própria Termelétrica, no ECC (Energy Control Center). O BOF Gás (se em excesso) também pode ser enviado para a Termelétrica, desde que a pressão no ponto de conexão do BOF Gás com a rede para a Termelétrica seja mais baixa do que a pressão na rede principal de BFG. Isto é realizado pelo uso de uma válvula como controladora da pressão.

Sob circunstâncias normais, o fluxo de BFG para os Flares será zero. A queima será automaticamente iniciada devido à alta pressão na rede principal ou devido ao controle de nível do gasômetro de BFG, ou ainda pela necessidade do operador (mudança de Set Point do controle de fluxo para pressão ou pela abertura direta de válvulas de controle do fluxo na cabeça (perna) do Flare na modalidade manual).

Há um total de 2x3 Regeneradores (3 em cada um dos 2 Altos Fornos). Dos seis regeneradores, normalmente dois estão em sopro e quatro deles no ciclo do gás ou em aquecimento; por exemplo: usando o Mix Gás como o combustível para o aquecimento.

Os quatro regeneradores em aquecimento necessitam juntos de aproximadamente 330.000Nm³/h do Mix Gás, equivalente a 82.500Nm³/h por regenerador. Durante a troca de um regenerador em aquecimento para sopro, o consumo do Mix Gas é reduzido em aproximadamente 25% durante o tempo de troca (aprox. 5 a 7 minutos), e o consumo dos Altos Fornos irão reduzir-se então na mesma proporção.

Os regeneradores dos dois Altos Fornos são interlocados de tal maneira, que a troca simultânea de dois regeneradores acontece ao mesmo tempo.

Esta variação regular do Mix Gás e do consumo resultante do BFG pode ser compensada pelo gasômetro de BFG, sem afetar o fluxo para Termoelétrica (Power Plant).

Sob uma situação equilibrada e normal do gás o nível do gasômetro de BFG deve ser mantido em um nível médio de 50%, a flutuação do consumo do BFG devido aos ciclos de troca dos regeneradores é protegida pelo Gasômetro e o fluxo para a Termoelétrica (Power Plant) pode ser mantido constante.

A tendência de variação do nível do Gasômetro, por longos períodos, tem que ser controlada pelo consumo de BFG na Termelétrica (Power Plant).

Toda esta estrutura é visualizada e operada pela Operação de Distribuição de Utilidades da Thyssenkrupp CSA através do sistema supervisor, figura 2.

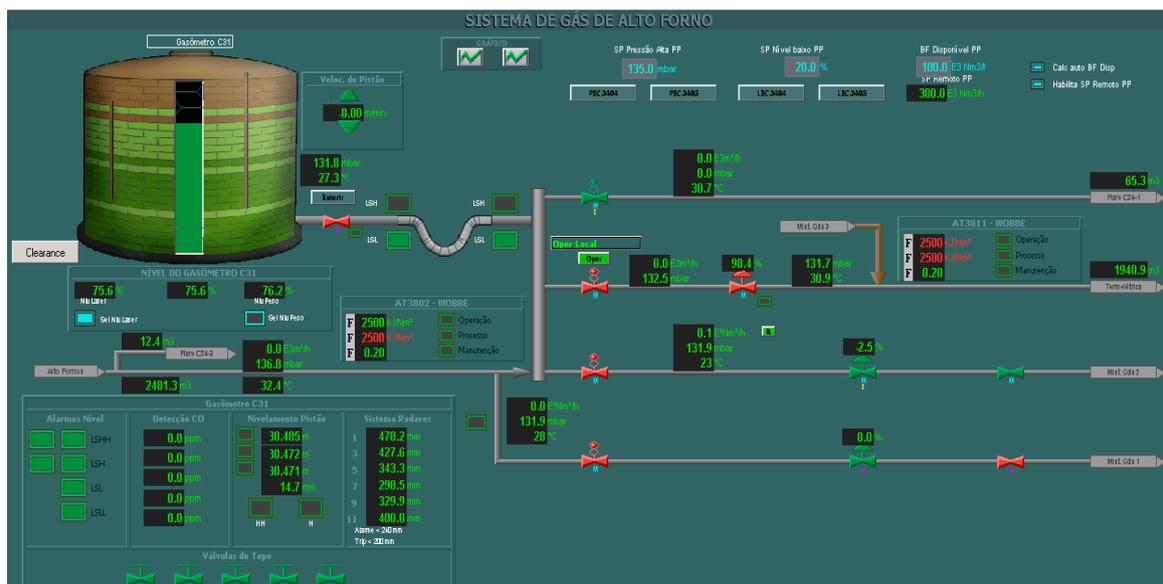


Figura 2. Tela de Processo do Sistema de Distribuição de Gás de Alto Forno – Gás System.

2.2 Observação dos Problemas

2.2.1 Coleta de dados

As Gerências de Operação e Manutenção do departamento de Utilidades da Thyssenkrupp CSA (TKCSA) no Rio de Janeiro/RJ relataram problemas nas medições de vazão dos gases siderúrgicos de alto forno da usina e no balanço energético do sistema de gases.

A tecnologia de medição adotada inicialmente no projeto para a medição de vazão dos gases siderúrgicos foi os elementos primários tipo Pitot de Média, sendo que estes medidores começaram a fornecer imprecisão na medição da vazão e conseqüentemente uma não coerência no fechamento do balanço energético do sistema de gases.

Na figura 3 observa-se que a obstrução dos orifícios do Pitot de Média gera ruídos e incerteza na medição de vazão, ou seja, a realidade de um diferencial de pressão inexistente, causado pelo condensado e particulado existente no gás siderúrgico do processo.



Figura 3. Trend Display de processo indicando leitura do Annubar em fim de escala devido presença de condensado e particulado

O conhecimento do tipo de fluido (líquido, gás, vapor) e suas propriedades, bem como as características de escoamento são fundamentais na escolha da tecnologia de medição de vazão a ser adotada. Deve-se verificar se o fluido compressível ou praticamente incompressível (líquidos) contém particulado sólido, e se tiver, qual o percentual deste. Esta confirmação foi realizada através de inspeção do elemento primário de medição de vazão tipo Annubar (Figura 4).

Outras características do fluido deveriam ser avaliadas, como; se o fluido é volátil, combustível, alimentício, radioativo, sujo; se é corrosivo, abrasivo, aderente; se há possibilidade de cavitação e/ou flashing, golpe de aríete, incrustação. A pressão e temperatura mínima, operacional e máxima, densidade, condutividade elétrica, composição, viscosidade devem ser conhecidas, e é claro, a própria vazão mínima, operacional e máxima; e se esta será medida em volume ou massa; são informações fundamentais a serem conhecidas na fase de projeto e escolha do tipo de medidor.

No caso de vazão volumétrica, é preciso definir se será medida nas condições de operação, ou base (normalizada ou outra referência), sendo necessário especificar as condições de pressão e temperatura utilizadas em qualquer um dos dois casos [2].

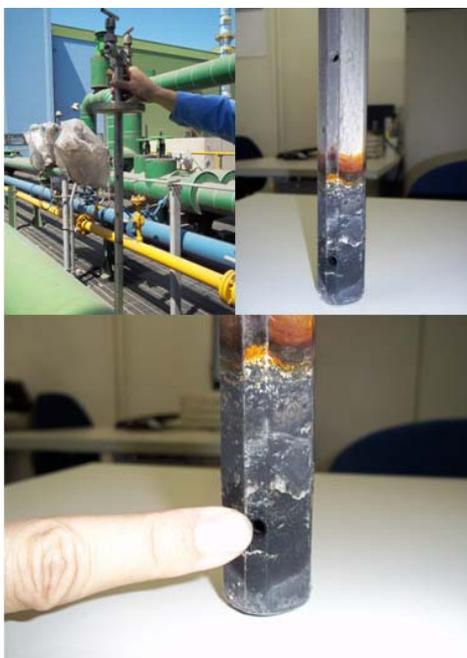


Figura 4. Orifício de elemento primário Pitot de Média obstruído por condensado e particulado.

2.3 Desenvolvimento

2.3.1 Escolha e análise das causas mais prováveis (hipóteses)

Foi observado que as sondas Pitot de Média ou Annubar, instaladas para medição de vazão do sistema de gases da TKCSA não são extraíveis em carga para realização de limpeza (Figura 5) e não aplicáveis em processos com fluidos com excesso de particulados. As sondas instaladas no complexo siderúrgico para a medição de vazão dos gases produzem pressões diferenciais muito baixas, incompatíveis com o uso de transmissores em split range, que seriam necessários para uma rangeabilidade de 20:1, como é o caso.



Figura 5. Processo de limpeza do elemento primário de medição de vazão Annubar

O Pitot de Média é um dispositivo de produção de pressão diferencial que ocupa todo o diâmetro do tubo (Figura 6), sendo projetado para medir a vazão total, de forma diferente dos dispositivos tradicionais de pressão diferencial.

No fim dos anos 70, foi desenvolvido o “Annubar” ou Pitot de Média, pela Dietrich. A finalidade do Pitot de Média é tomar, ao mesmo tempo, as pressões dinâmicas relativas a 4, 6 ou 8 velocidades ao longo de um diâmetro da tubulação e fazer sua média.

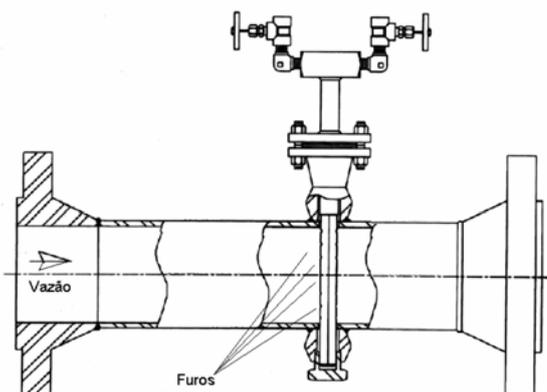


Figura 6. Montagem de Sonda Tipo “Annubar” ou Pitot de Média

Para tanto, os furos de medição são distribuídos segundo a teoria estatística de Chebishev, de forma que cada furo esteja no centro de gravidade de áreas adequadamente calculadas. A pressão diferencial assim medida é representativa da vazão, independentemente, do perfil de velocidades (Figura 7).

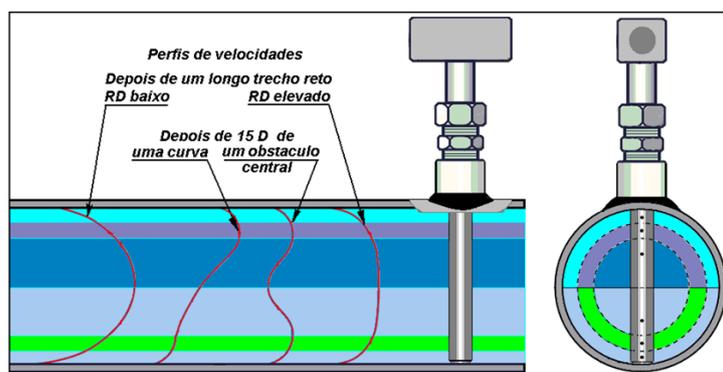


Figura 7 - Tubo de Pitot de Média e áreas de igual peso na média.

A equação geral dos tubos de Pitot de Média é a mesma que para os clássicos (em L), afetada de um fator K que depende da realização do instrumento, especialmente do perfil da haste de medição.

A parte de alta pressão do sinal de ΔP (diferencial de pressão) é produzida pelo impacto do fluido nos furos do sensor, sendo então separado e fluindo em volta do Pitot de Média. Precisamente localizados, os furos sensores na parte frontal sentem a pressão de impacto causada pelo fluido (Figura 8).

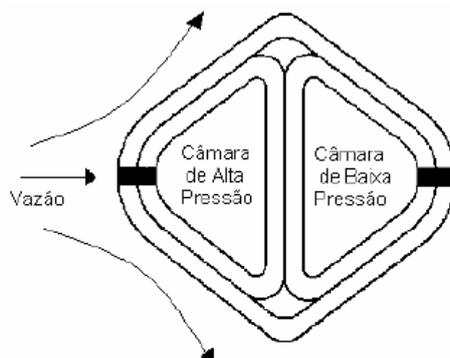


Figura 8 - Tubo de Pitot de Média e câmaras de alta e baixa pressão

Após o fluido separar-se em torno do sensor Pitot de Média, uma zona de baixa pressão (abaixo da pressão estática no tubo) é criada devido ao formato do sensor. O lado de baixa pressão do sinal de ΔP é sentido pelos furos na jusante do Pitot de Média e é medida na câmara da jusante.

A diferença de pressão é proporcional à raiz quadrada da vazão, assim detalhado na equação 1 e na figura 9.

$$Q = K * \sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

A constante K depende de fatores como relação entre orifício e tubulação, e características do fluido.

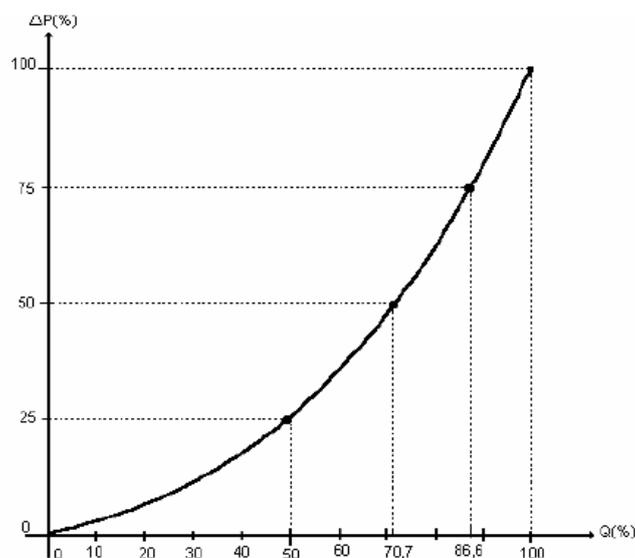


Figura 9 - Relação Vazão X Diferencial de Pressão

É importante observar, que o ΔP varia quadraticamente em função da vazão Q (Tabela 1).

Tabela 1 - Relação proporcional entre diferença de pressão e a raiz quadrada da vazão

Vazão	ΔP	Saída do FT	Indicação do FI escala linear	Indicação do FI escala quadrática
100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
86,60	75,00	75,00	75,00	86,60
70,70	50,00	50,00	50,00	70,70
50,00	25,00	25,00	25,00	50,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Este elemento primário é largamente usado na indústria, e tem como principais vantagens:

- a propriedade de provocar uma perda de carga permanente reduzida;
- a possibilidade de ser inserido ou retirado em carga. No caso da Thyssenkrupp CSA não foi adotado o medidor retrátil, o que dificulta a realização de limpeza e inspeções no elemento primário.

Entretanto, como cada fabricante tem uma tecnologia própria, não é possível elaborar uma norma com detalhes construtivos que permitam seu uso sem calibração dinâmica. Uma norma especificando as características gerais, as condições de ensaio para aprovação de modelo e as especificações mínimas de forma a garantir sua confiabilidade metrológica parece ser possível num futuro próximo.

2.3.2 Elaboração da estratégia e execução da ação

As principais dificuldades para a medição de vazão dos gases de Alto Forno são as características do gás gerado durante o processo de fabricação industrial da gusa; e devido à performance de medição das sondas do Pitot de Média instalada, foi observado a necessidade da troca de tecnologia de medição.

Através das análises das instalações, trecho reto disponível de medição, diâmetro da tubulação, disponibilidade de retirada das sondas em carga para realização de limpeza e características de funcionalidade de diversas tecnologias; adotou-se o medidor ultrassônico por Tempo de Trânsito.

O medidor Ultrassônico de tempo de trânsito mede a diferença entre o tempo que o pulso ultrassônico leva ao se propagar a favor do escoamento e o tempo ao se propagar contra o escoamento. Os medidores ultrassônicos por tempo de trânsito dispõem de transdutores com cristais piezelétricos que enviam e recebem pulsos acústicos de alta frequência, transversalmente à tubulação. O pulso que segue na direção do escoamento (Figura 10), de T1 para T2, percorre a distância entre os transdutores em um intervalo de tempo menor do que o pulso que segue na direção oposta, de T2 para T1. A diferença entre os tempos de propagação será proporcional à velocidade média dos elementos presentes na trajetória, no tempo em que o pulso cruzar a tubulação.

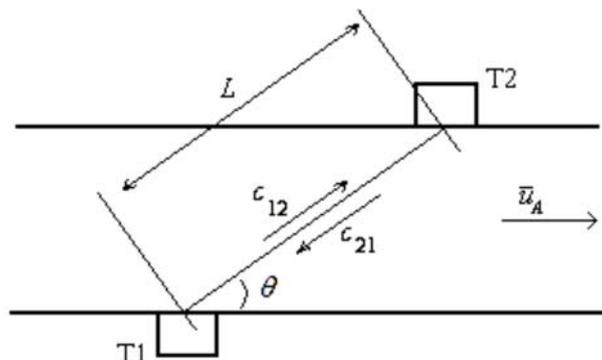


Figura 10 - Esquema de funcionamento de um medidor ultrassônico de *tempo de trânsito*

Nas instalações do estudo de caso da empresa Thyssenkrupp CSA, os medidores ultrassônicos são de inserção e são inseridos diretamente em flanges com válvula esfera, instalados e soldados nas tubulações através da tecnologia do furo em carga (em operação), sem que haja necessidade de interrupção do processo fabril (Figura 11).

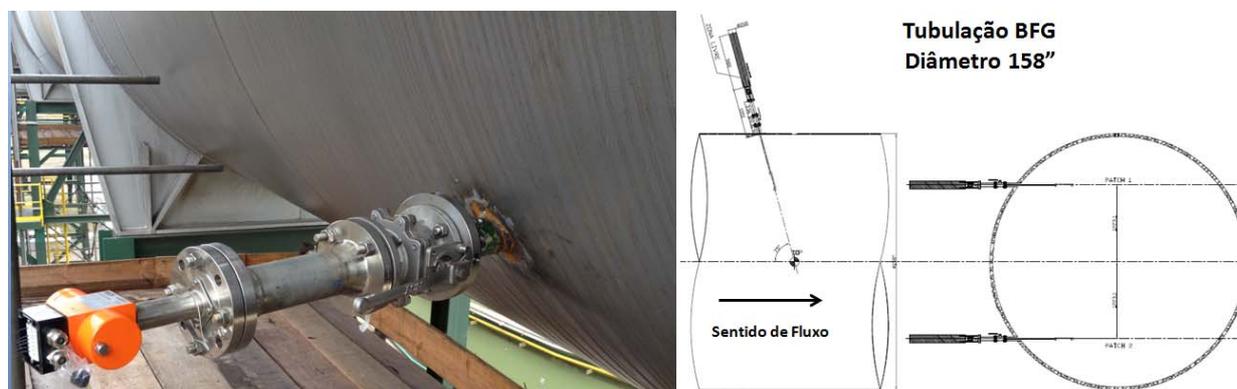


Figura 11 – Instalação de medidor ultrassônico por tempo de trânsito em flange montada

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização da substituição do Pitot de Média em um dos pontos de medição com divergências no balanço energético (entrada de BFG no sistema de gases) por um par de medidores ultrassônicos, dois feixes (multicanal), observou-se uma medição de vazão com perfil de consumo que refletia a realidade do processo de fabricação e o fechamento do balanço energético (Figura 12), comprovando a eficiência deste tipo de tecnologia e suas respectivas vantagens como a extração das sondas para realização de manutenção e limpeza dos transdutores. Este tipo de medidor multicanal é amplamente utilizado para os casos onde há existência de uma concentração maior de umidade e particulado, grandes diâmetros (158" para esta aplicação da TKCSA), altas velocidades de fluxo e a necessidade de transferência de custódia, de acordo com a AGA9 (American Gas Association).

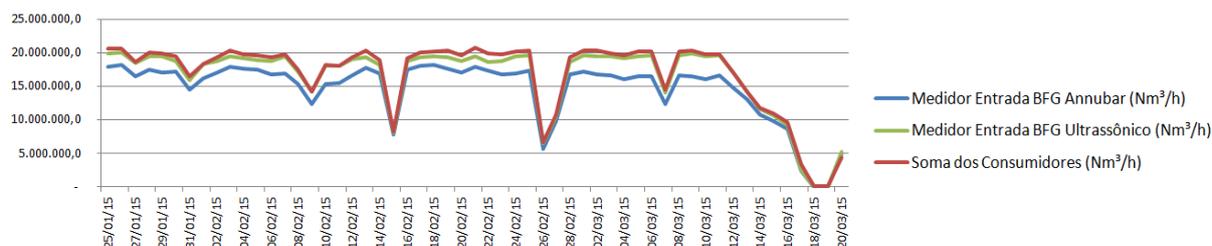


Figura 12. Balanço de Gases entre Entrada de BFG (Medidor Ultrassônico e Annubar) e a soma dos consumidores internos.

Após a instalação, o medidor de vazão Ultrassônico por Tempo de Trânsito FLOWSIC 100 EX-PR (retrátil – 2 feixes de medição) passou por um período de testes de performance, onde foi acompanhado o perfil da vazão, o balanço energético e as indicações de alarme na unidade eletrônica das sondas (MCU) onde foi possível identificar a periodicidade de limpeza e manutenção requerida pelos sensores.

Foi observado que devido a grande quantidade de particulado e condensado presente no Gás de Alto Forno, a periodicidade de limpeza das sondas e transdutores deveria ser ajustada para uma frequência semanal (Figura 13).

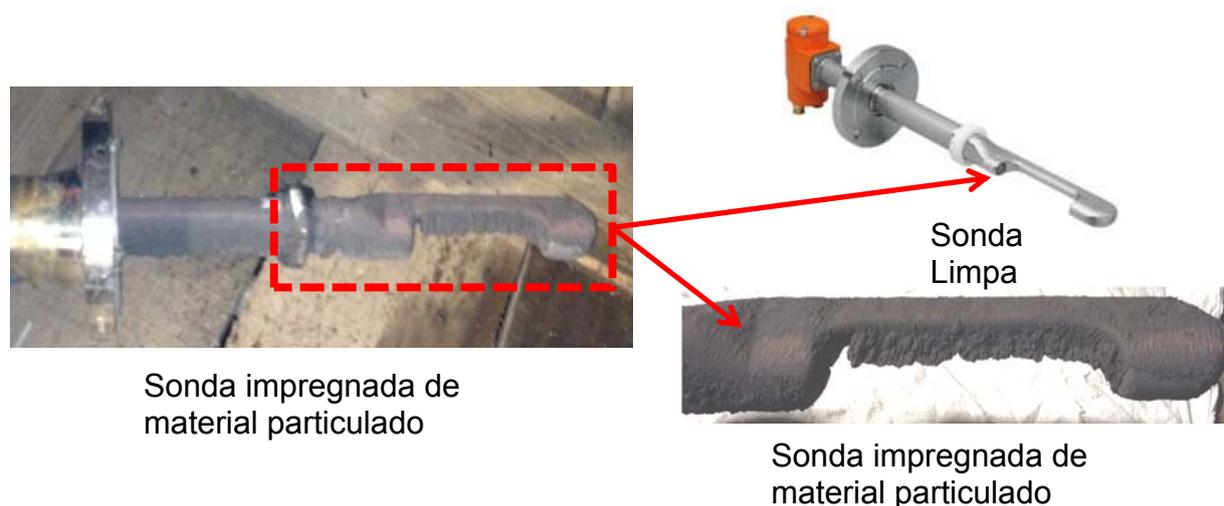


Figura 13. Inspeção de Sondas Ultrassônicas a fim de realização de limpeza das mesmas.

A periodicidade entre as limpezas das sondas será sempre ajustada no plano de manutenção conforme as características observadas neste gás siderúrgico, principalmente concentração de particulado e excesso de condensado.

4 CONCLUSÃO

Durante este trabalho foram apresentadas as principais dificuldades encontradas na medição de vazão dos gases de Alto Forno, assim como a tecnologia de medição adotada para resolução deste problema.

Na concepção inicial do projeto de medição de vazão dos gases de Alto Forno da Thyssenkrupp CSA, adotou-se o elemento primário tipo Pitot de Média para a medição de vazão destes gases devido aos grandes diâmetros das tubulações e a escassez de trechos retos nas instalações. Como os gases siderúrgicos da usina possuem umidade e concentrações consideráveis de particulados, optou-se pela realização de um estudo a fim de substituir os atuais medidores Pitot de Média por uma tecnologia ultrassônica por tempo de trânsito, justamente por este tipo de sensor medir gases

úmidos e sujos, capacidade de medir vazões em tubulações de grandes diâmetros e possibilidade de extração das sondas da tubulação sem a necessidade de parada de processo (em carga).

Para o entendimento completo das dificuldades encontradas na medição de vazão dos gases siderúrgicos foi necessário à apresentação dos conceitos básicos de medidores de vazão deprimogênicos, medidores de vazão ultrassônicos e a instrumentação utilizada na normalização da vazão medida pela malha de controle. Este trabalho teve por objetivo ilustrar conhecimentos a cerca de medidores de vazão ultrassônicos, em especial os medidores por tempo de trânsito, contribuindo com a difusão do tema. Por fim, este trabalho não tem o objetivo de ser definitivo, isto é, espera-se que novos textos sejam escritos e até venham a substituir parte do conhecimento conforme o mesmo seja aprimorado.

REFERÊNCIAS

- 1 DELMÉE, G., Manual de Medição de Vazão, São Paulo, Editora: Blucher – 3ª edição – 2003.
- 2 GONÇALVES, Genildo Marques. Seleção de Medidores de Vazão (ou Va\$ão?!). Uma ótica de Engenharia. InTech, São Paulo, n. 142, p. 34 – 39, 2011.

BIBLIOGRAFIA

- 1 MARTINS, N., Manual de Medição de Vazão através de placas de orifício, bocais e venturis, Rio de Janeiro, Editora: Interciência, 1998.
- 2 BEGA, E. (organizador), Instrumentação Industrial, Rio de Janeiro, Editora: Interciência – 2ª edição – 2006.
- 3 CAMPOS, M.; e TEIXEIRA, H. Controles Típicos de equipamentos e processos industriais, São Paulo: Editora: Blucher – 1ª edição-2006.
- 4 MARTINS, N.; Manual de medição de vazão através de placas de orifício, bocais e venturis, Rio de Janeiro, Editora: Interciência - 1ª Edição – 1998.
- 5 WEBER, R., Notas de Aula da Matéria de Medição Fiscal e Transferência de Custódia – Curso de Instrumentação Industrial IBP - 2011.
- 6 DELMÉE, G., Relatório de Consultoria – Avaliação do Sistema de Medição de Vazão dos Gases Siderúrgicos, Thyssenkrupp CSA Siderúrgica do Atlântico, Rio de Janeiro, Fevereiro de 2011.
- 7 PONTIFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. Repositório Institucional. Disponível em: http://www.maxwell.lambda.ele.puc.rio.br/16724/16724_3.PDF. Acesso em: 28 de mar. 2013.
- 8 CASSIOLATO, Cesar; ORELLANA, Evaristo. Medição de Vazão. Disponível em: <http://www.smar.com/brasil/artigostecnicos/artigo.asp?id=80> Acesso em: 15 de abr. de 2013
- 9 INMETRO, Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, Duque de Caxias, 1995.
- 10 Planejamento e Gerenciamento de Comissionamento de Plantas Industriais. InTech, São Paulo, ISA Distrito 4, edição 142, 2012.