MÉTODO NÃO INTRUSIVO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA EM TUBULAÇÕES

NON-INTRUSIVE METHOD FOR MEASURING WATER FLOW RATE IN PIPE

*MEDEIROS, K. A. R. ¹; BARBOSA, C. R. H. ²; OLIVEIRA, E. C. de ³

^{1,2} Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, ¹Departamento de Engenharia Química e de Materiais,

²Programa de Pós Graduação em Metrologia, Qualidade, Inovação e Sustentabilidade
R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, 22430-060, Rio de Janeiro-RJ, Brasil
(fone: 21 3527-1001)

³ Petrobrás Transporte S.A.

Av. Pres. Vargas, 328 - Centro, 20071-000, Rio de Janeiro - RJ, Brasil

* Autor correspondente

e-mail: kmedeiros@aluno.puc-rio.br

Received 12 May 2015; received in revised form 18 November 2016; accepted 03 December 2016

RESUMO

O transdutor mais empregado para a medição de vibrações é o acelerômetro piezoelétrico. Esta aplicação tem sido explorada para medição de vazão, uma vez que alguns trabalhos verificaram a estreita correlação entre vazão e vibração. A técnica, que consiste em medir a vibração induzida pelo fluxo na tubulação, vem sendo cogitada como promissora, no sentido de possibilitar o desenvolvimento de um sensor que apresente características vantajosas como não intrusividade, não invasividade e custo reduzido. Este trabalho apresenta um método de medição de vazão em tubulações baseado na vibração causada pela passagem da água, eliminando a necessidade de interrupção do fluxo e de abertura da tubulação para instalação de hidrômetros. Apresentam-se medições experimentais e uma validação metrológica em laboratório acreditado para calibração de medidores de vazão.

Palavras-chave: *Vibração de Tubulação, Acelerômetro Piezoelétrico.*

ABSTRACT

The transducer most widely used for vibration measurement is the piezoelectric accelerometer. This application has been explored for flow rate measurement, since some studies have verified the narrow correlation between ratio of flow and vibration. The technique consists of measure the vibration induced by the flow in the pipeline, has been considered as promising, in the sense of enabling the development of a sensor that presents advantageous characteristics such as non-intrusiveness, non-invasiveness and reduced cost. This paper shows the method of measurement of flow in pipe based on vibration caused by transit of water, without the need of flow interruption or opening of pipe for installation of water meters. Further are present experimental measurements and metrological validation in laboratory accredited for calibration of flowmeters.

Keywords: *Pipe Vibration, Accelerometer Piezoelectric.*

INTRODUÇÃO

A medição de vazão de fluidos é utilizada em muitas aplicações para diferentes propósitos. Algumas delas incluem o fornecimento de dados para o controle do sistema, análise de processos, contabilidade de rendimento e consumo (Evans, 2004).

A diversidade de aplicações e, em geral, o fato de que as medições dinâmicas demonstram propriedades completamente distintas contribuem para a existência de uma variedade muito grande de medidores. Isto se faz necessário para atender aos tipos e condições físicas do fluido, além de aspectos como exatidão, faixa de operação, custo, complexidade, facilidade de leitura, tempo de vida em serviço e, principalmente, princípio de medição utilizado.

Geralmente, medidores de vazão podem ser classificados como invasivos ou não invasivos, e intrusivos ou não intrusivos, dependendo da perturbação que o elemento transdutor introduz na medida (Oliveira, 2010).

Existem muitos medidores de vazão de alta qualidade e diversas técnicas de medição; no entanto, observa-se nesses medidores limitações que precisam ser superadas. Assim sendo, pesquisas são necessárias no intuito de investigar novas técnicas de medição, preferencialmente não invasivas, não intrusivas e de baixo custo, que permitam o desenvolvimento de um sensor de fluxo que supere as deficiências das técnicas existentes.

Notadamente, no caso de medição de vazão de água, a disponibilidade de um medidor não invasivo, não intrusivo, de baixo custo e fácil instalação traria claras vantagens financeiras e operacionais para as empresas fornecedoras e para os consumidores finais.

Assim, este trabalho propõe-se a avaliar uma técnica recentemente desenvolvida de medição de vazão de fluidos, baseada na vibração captada por um acelerômetro ligado à superfície de um duto (Evans, 2004), dispensando a necessidade de interromper o fornecimento do fluido e de seccionar a tubulação para instalação de medidores convencionais como os hidrômetros.

Em síntese, a técnica consiste em medir a vibração induzida pela passagem do fluido em um duto, conhecida como Flow Induced Vibration (FIV), de modo que a vazão seja estimada a

partir do desvio padrão da medição dessa vibração (Evans, 2004).

O acelerômetro piezoelétrico é o transdutor de aceleração mais utilizado para medição de vibração (Bojko, 2005), destacando-se por apresentar algumas características importantes, como grande faixa de frequência e amplitude, relativa robustez e estabilidade satisfatória ao longo do tempo (Rodrigues, *et al.*, 2004), sendo, portanto o dispositivo de medição empregado neste trabalho.

Com o propósito de alcançar o objetivo almejado, realizou-se um estudo experimental (Medeiros, 2014) para obtenção de dados em um laboratório acreditado de calibração de medidores de vazão e os mesmos foram processados, estimando-se uma vazão para cada vibração medida, acompanhada por uma análise de incertezas.

CONTEXTO

A medição baseada na Flow Induced Vibration (FIV) é uma tecnologia não regulamentada pelos códigos e normas industriais. De acordo com (Filho, 2010), em uma grande extensão a FIV é um problema operacional, mais comum na indústria nuclear, sendo vista mais frequentemente como um caso um tanto quanto misterioso por engenheiros e ainda a ser completamente entendido.

Geralmente, em virtude das falhas ocasionadas pelos componentes serem muito caras em termos de reparos e perda de produção, as vibrações induzidas em tubulações são indesejáveis (Pettigrew, *et al.*, 1998). Mas, recentemente, graças aos desenvolvimentos tecnológicos significativos nos componentes eletrônicos, incluindo os computadores, que permitem monitorar simultaneamente diversas variáveis de forma rápida e automatizada (Santos, *et al.*, 2012), a FIV vem sendo cogitada como uma técnica promissora pelos pesquisadores, no sentido de possibilitar o desenvolvimento de um sensor que apresente características vantajosas como não intrusividade, não invasividade e custo reduzido.

Baseando-se nas leis de movimento de Newton, (Evans, *et al.*, 2004) consideraram que a massa de um fluido pode ser indiretamente medida, medindo-se a aceleração que ela transmite para outro corpo.

Diante disso, esses autores fizeram uma combinação de métodos analíticos, numéricos e

experimentais, e assim puderam confirmar a viabilidade da técnica FIV ao verificarem que o desvio padrão do sinal do acelerômetro que media a vibração aumentava com a vazão, sendo mais bem ajustado por um polinômio de segundo grau. Ressalta-se que tal relação de proporção depende de outros parâmetros, como a geometria, posição do sensor (Krieser, 2008) e o material do duto.

Assim, este trabalho busca estimar indiretamente os valores de vazão por meio dos dados de vibração coletados por acelerômetros piezoelétricos fixados à tubulação. Os ensaios deste trabalho, diferentemente da maioria dos estudos publicados com essa temática, não utilizaram bancadas de testes previamente construídas sob as condições mais ideais possíveis, para essa finalidade, mas foram realizados em uma linha padrão de calibração de medidores de vazão em um laboratório acreditado da RBC.

Partindo do princípio de que a correlação direta entre a vibração do duto e a vazão pode ser determinada conforme a explicação supracitada, o objetivo deste artigo passa pela obtenção e validação metrológica de tal correlação, incluindo a estimativa das incertezas de medição.

MONTAGEM EXPERIMENTAL/ ENSAIOS

Baseando-se na literatura especializada disponível, acelerômetros de diferentes sensibilidades - um com 10 mV/g (A10) e outro com 100 mV/g (A100) - foram instalados em um trecho reto de uma linha de calibração de medidores de vazão conforme Figura 1.

Figura 1. Acelerômetros instalados
Ligou-se a bomba de injeção de água e

uma vazão de 10 até 110 m³/h foi liberada sistematicamente em passos de 10 m³/h. Três medições foram realizadas para cada vazão.

As vazões foram medidas simultaneamente pelo medidor padrão do laboratório - do tipo mássico Coriolis - e pelos acelerômetros, mantendo o tempo de coleta de dados em 20 segundos, não podendo este ser menor por limitações do laboratório.

A tubulação utilizada é constituída de aço carbono com diâmetro de quatro polegadas (101,6 mm). Os acelerômetros utilizados foram os modelos 752-10 e 752-100 do fabricante ENDEVCO, com faixa de operação de ± 500 G e ± 50 G respectivamente, e frequência de resposta até 50 kHz.

A taxa de amostragem utilizada foi de 19200 Hz que, de acordo com o teorema de Nyquist, permite observar fenômenos com frequências menores que 9600 Hz.

Esse procedimento foi realizado três vezes para uma mesma condição de medição, a fim de extrair médias, verificar sua repetibilidade, bem como a influência de fatores externos no momento da medição.

PROCESSAMENTO DOS SINAIS

Inicialmente, os dados foram transformados do domínio do tempo para o domínio da frequência (Figura 2) sendo detectada, conforme esperado, a interferência eletromagnética da rede elétrica em 60 Hz e harmônicas. Observou-se, ainda, um consistente sinal na faixa de 17 a 20 Hz, que considerou-se ser proveniente da vibração introduzida pela bomba.

Figura 2. Exemplo de sinais processados

Assim, foi necessário utilizar filtros digitais nos sinais adquiridos, de modo a remover o sinal nessas frequências.

Para a interferência da rede elétrica, optou-se por um filtro digital do tipo 'notch comb', que remove pontualmente os múltiplos de 60 Hz até metade da frequência de aquisição. E para a interferência mecânica, empregou-se um filtro corta-faixa de 'Butterworth' de 8ª ordem, com frequências de corte inferior em 16 Hz e superior em 22 Hz.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os ensaios pós-processados separadamente em software MATLAB®, pôde-se extrair o desvio padrão amostral (s) dos valores de vibrações medidos correspondente a cada vazão (Q) para as três medições efetuadas com os dois acelerômetros, conforme indicado na Figura 3.

Figura 3. Desvio padrão correspondente a cada vazão

De posse dos desvios-padrão medidos pelos dois acelerômetros, verificou-se que parte da resposta vibratória encontrada mostrava-se associada a efeitos como vibrações da bomba e do compressor de ar, bem como às próprias limitações de capacidade dos mesmos, e ainda à própria frequência de ressonância do duto.

Assim, descartaram-se a primeira (9,82; 9,95 e 10,11 m³/h) e a última série de medidas

(109,78; 109,75 e 109,77 m³/h). Além disso, de acordo com o teste de Grubbs, os outliers foram excluídos.

Com isso, um gráfico de desvio-padrão versus vazão foi gerado para ambos os acelerômetros (Figura 4), podendo-se observar uma relação aproximadamente quadrática entre o desvio-padrão amostral do sinal de vibração (s) e a vazão (Q).

Figura 4. Obtenção da relação quadrática para os dois acelerômetros

Assim, uma vez adquirida a relação direta entre a vazão e a vibração, partiu-se para o objetivo principal, que era estimar a vazão a partir dos valores de vibração medidos.

ESTIMATIVA DA VAZÃO E DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

No intuito de fazer com que os dados de vibração sirvam para estimar os valores de vazão, realizou-se um tratamento metrológico dos dados, tais como estimativa da vazão, erros percentuais e análise de incerteza.

Inicialmente, os valores de vazão foram ajustados - pelo método de ajuste quadrático (Oliveira *et al.*, 2009) - onde os valores dos

coeficientes b_i podem ser calculados, resolvendo uma única equação matricial: $b = (X^t X)^{-1} X^t Y$, em que a matriz $(X^t X)$ não seja singular. Para um modelo de segunda ordem, $y_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 x_i^2$, onde x_i representa a variável independente no i -ésimo nível, o sistema matricial é representado por:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_i & x_i^2 \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Estas matrizes são utilizadas para expressar o cálculo das incertezas nas estimativas dos parâmetros b_0 , b_1 e b_2 , a partir da matriz de covariância dada pela equação:

$$V(b) = \begin{bmatrix} V(b_0) & Cov(b_0, b_1) & Cov(b_0, b_2) \\ Cov(b_0, b_1) & V(b_1) & Cov(b_1, b_2) \\ Cov(b_0, b_2) & Cov(b_1, b_2) & V(b_2) \end{bmatrix}$$

Diante disso, realiza-se o cálculo da raiz quadrada dos elementos da diagonal principal, onde torna-se possível a obtenção das incertezas padrão de b_0 , b_1 e b_2 e a sua covariância, Cov . A incerteza associada com o ajuste quadrático dos mínimos quadrados é calculada pela Equação 1 e os resultados estão indicados na Figura 5.

$$u_{c(x)}^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial y} u_{\hat{y}} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b_0} u_{b_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b_1} u_{b_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b_2} u_{b_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial x}{\partial b_0} u_{b_0} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial b_1} u_{b_1} \right) r_{b_0, b_1} + 2 \left(\frac{\partial x}{\partial b_0} u_{b_0} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial b_2} u_{b_2} \right) r_{b_0, b_2} + 2 \left(\frac{\partial x}{\partial b_1} u_{b_1} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial b_2} u_{b_2} \right) r_{b_1, b_2}$$

Eq. 1

Figura 5. Ajuste quadrático e incerteza do ajuste para o A10 e para o A100

Para a análise das incertezas têm-se como componentes, além da incerteza do ajuste (u_a), a incerteza do medidor padrão (u_p) mássico Coriolis, declarada pelo certificado de calibração como igual a $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$, a incerteza do transdutor (acelerômetro) que já faz parte dos coeficientes da regressão, sendo que sua resolução ($R = 0,0001 \text{ m/s}^2$) não foi incluída em virtude de ter apresentado um valor ínfimo (muito abaixo do menor ponto ajustado: $0,048 \text{ m/s}^2$) perante o ajuste da curva, de modo que tornou-se desprezível.

Assim, a incerteza-padrão combinada já pode ser calculada, baseando-se na Equação 2 a seguir:

$$u_c = \sqrt{(u_a)^2 + (u_p)^2} \quad \text{Eq. 2}$$

Com base na equação anterior, a incerteza padrão combinada foi estimada. Para o cálculo da incerteza expandida (Equação 3), as fontes de incertezas devem ser identificadas, pois quando uma componente de incerteza do "Tipo A" é avaliada por um número reduzido de observações ($n < 30$), torna-se mais adequado atribuir a distribuição dos dados a uma distribuição de probabilidade t-Student.

$$U = t_s \times u_c \quad \text{Eq. 3}$$

Assim, a incerteza expandida foi estimada (Figura 6) com base em uma distribuição t -Student (t_s) com $(n-3)$ graus de liberdade, para um dado nível de confiança $(1-\alpha)$.

Figura 6. Estimativa da incerteza expandida do A10 e do A100

Cabe mencionar que, a partir de certo valor da vazão indicada (em torno de 60 m³/h) o comportamento da vazão ajustada tende a melhorar consideravelmente, tanto no A10 quanto no A100, sugerindo que abaixo disso o tubo pode não estar preenchido completamente, o que implica em maior vibração e discrepância no conjunto dos dados.

CONCLUSÕES

A estimativa da incerteza de medição associada à medição de vazão e da propagação de incerteza de medição de vazão por técnica FIV permitiram concluir, com base nos resultados experimentais extraídos de uma linha de calibração de medidores de vazão com acelerômetros fixados a uma tubulação de aço carbono que o método FIV mostra-se viável para aplicação na medição de vazão de água, uma vez que a incerteza estimada para alguns valores de vazão medidos encontra-se próxima à faixa exigida para calibração de medidores de água (hidrômetros) para os quais, conforme encontra-se na Portaria INMETRO nº 246 (2000), a variação relativa da vazão durante cada ensaio não deve exceder o intervalo de valores $\pm 2,5\%$ para vazões compreendidas entre a vazão mínima ($Q_{\min}$) e a vazão de transição (Q_t) inclusive, e $\pm 5,0\%$ para vazões entre Q_t e a vazão máxima ($Q_{\max}$). Além disso, esta aplicação

para os acelerômetros via técnica FIV, tem potencial para poder atender à demanda existente por um sistema que permita medir esta variação (flutuação) da vazão durante a calibração, sabendo-se que este setor ainda não se encontra com os documentos normativos correlatos bem definidos.

AGRADECIMENTOS

À LC Controls Metrologia, pela liberação do laboratório e pelo apoio da equipe, contribuindo de modo fundamental para a viabilização deste trabalho. Ao laboratório de vibrações da PUC-Rio. A CAPES, pela bolsa de estudo concedida ao primeiro autor durante seu Mestrado em Metrologia na PUC-Rio.

REFERÊNCIAS

1. Evans, R. P. Mass Flow Measurement Through. Idaho State University, Doctoral Dissertation, **2004**.
2. Oliveira, M. A. A. D. Desenvolvimento de um medidor de vazão termal inteligente. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica. Rio de Janeiro-RJ, 114, **2010**.
3. Bojko T. AGH University of Science and Technology Cracow Department of Robotics and Machine Dynamics. Smart Sensor Solutions for Mechanical Measurements and Diagnostics. Metrol. Meas. Syst., **2005**, 12, 95–104.
4. Rodrigues, J. R; Campos, A. N; Mateus, C. F. R; Sutério, R. Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual. Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial. 06, **2010**, Rio de Janeiro-RJ.
5. Medeiros, K. A. R. Análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós Graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, **2014**.
6. Filho, P. H. A. W. Método para determinação das frações volumétricas de escoamentos bifásicos baseado na análise de funções de resposta em frequência da duto. Dissertação

- (mestrado) – Universidade Federal Fluminense. Niterói-RJ, 75, **2010**.
7. Pettigrew, M. J; Taylor, C. E; Fisher, N. J; Yetisir, M; Smith, B. A. W. Flow-induced vibration: recent findings and open questions. *Nuclear Engineering and Design*. **1998**, 185, 249–276.
 8. Santos, A. F. M; Duarte, M. A. V; Arencibia, R. V; Marques, V. A. da S. Aplicação de acelerômetros de baixo custo em sistemas automatizados de medição. Simpósio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. 20, Uberlândia-MG, **2012**.
 9. Evans, Robert P.; Blotter, Jonathan D.; Stephens, Alan G. Flow Rate Measurements Using Flow-Induced Pipe Vibration. *Journal of Fluids Engineering*, **2004**, 126, 2, 280-285.
 10. Krieser W.. Positioning the sensor in sampling Flowmeters. Silesian University of Technology Gliwice, Metrology and Measurement Systems, **2008**, 15, 1.
 11. Oliveira, E. C. de; Aguiar, P. F. Validação da metodologia da avaliação de incerteza em curvas de calibração melhor ajustadas por polinômios de segundo grau. *Química Nova*, 6, 32, 5, **2009**.
 12. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria INMETRO Nº 246, de 17 de outubro de **2000**.