

DETECÇÃO DE DANOS EM TUBULAÇÕES USANDO A TÉCNICA BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA (EMI)

JULIÁN L. PITA*, ANTONIO E. TURRA†, JOZUÉ VIEIRA FILHO‡

**Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Departamento de Engenharia Elétrica
UNESP- Univ Estadual Paulista*

*†Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Departamento de Engenharia Mecânica
UNESP- Univ Estadual Paulista*

*‡Engenharia de Telecomunicações
São João da Boa Vista / SP
UNESP- Univ Estadual Paulista*

Emails: jlpitar@unal.edu.co, turra@dem.feis.unesp.br, jozue.vieira@sjbv.unesp.br.

Abstract— The electromechanical impedance (EMI) technique has been efficiently in structural health monitoring (SHM) systems for different structures, this technique monitor the structural integrity by exciting and sensing a piezoelectric transducer. In this work are monitoring two structures with EMI technique, the first structure is a iron tube and the second structure is a pipeline with constant water flow. Were analyzed the effects of transducers position on the structure and the frequency of excitation more appropriate for generate to achieve the highest sensitivity to damage.

Keywords— EMI, PZT, Pipeline.

Resumo— A técnica da impedância eletromecânica (EMI) é utilizada de maneira eficiente em sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) para uma grande variedade de estruturas, esta técnica faz o monitoramento mediante a excitação e detecção de um transdutor piezoelétrico. Neste trabalho são monitoradas duas estruturas com a técnica da EMI, a primeira é um tubo de aço e a segunda é uma tubulação com fluxo constante de água. Foram analisados os efeitos do posicionamento do transdutor na estrutura e a frequência de excitação mais adequada para maior sensibilidade ao dano.

Palavras-chave— EMI, PZT, Tubulação.

1 Introdução

A maioria das empresas Brasileiras de distribuição de água, gás e petróleo consideram as tubulações como o melhor meio de transporte de fluidos para grandes distâncias, porque este apresenta menores custos, maior segurança, menores riscos de acidentes e/ou danos ao ambiente quando comparados ao transporte terrestre, ferroviário ou marítimo.

Os sistemas de detecção de danos em tubulações tem um papel muito importante na indústria já que podem cruzar áreas densamente povoadas. Além disso, os produtos transportados pelas tubulações são muito caros, por isso é necessário que as tubulações tenham uma alta segurança para poder impedir vazamentos, e assim, conseguir evitar danos ambientais, prejuízos econômicos e também para evitar riscos para as pessoas.

Logo, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas para a detecção de vazamentos e principalmente se estas forem de baixo custo e com alta sensibilidade. Certamente, o presente estudo irá contribuir no sentido do desenvolvimento de novas técnicas e/ou ferramentas aplicadas a detecção de vazamento em tubulações metálicas utilizando a técnica da EMI (Electro-Mechanical Impedance) e transdutores PZT (Titanato Zirconato

de Chumbo).

A solução proposta neste trabalho são os sistemas de monitoramento de integridade estrutural, já que são muito confiáveis e econômicos. Em geral, SHM tem aplicação dentro das áreas da indústria aeroespacial, engenharia civil e engenharia mecânica. O processo de SHM envolve o uso de um conjunto de sensores distribuídos ao longo de uma estrutura para fazer observações periódicas da resposta dinâmica do sistema. As observações determinam se há danos presentes no sistema, após a análise estatística dos dados coletados.

No caso da pesquisa deste trabalho, os sistemas de interesse são as tubulações. Há vários elementos num sistema de tubulação, dentro dos quais estão o corpo principal dos segmentos de tubos simples, juntas flangeadas e soldadas, válvulas, conexões, e estações de bombeamento. Especificamente, o presente estudo coloca ênfase sobre o controle da integridade estrutural do corpo principal dos segmentos dos tubos simples. Para implementar um sistema de SHM uma tubulação, uma série de sensores implantados em vários locais ao longo do eixo do tubo é usada para fazer as observações do estado da estrutura.

Em sistemas de tubulações podem ocorrer dois tipos de vazamentos. O vazamento por rup-

tura, este é mais fácil de ser detectado por causar grandes quedas de pressão e de perda de volume. Os vazamentos de pequenas proporções, causados por erosão, corrosão, fadiga e defeitos na solda, são mais difíceis de serem detectados, neste artigo um vazamento pequeno é testado.

2 SHM Baseado na Impedância Eletromecânica

Os sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm como finalidade detectar, em tempo real ou não, danos estruturais em um vasto campo de aplicação tais como estruturas civis (pontes, edifícios, estradas e plataformas petrolíferas.), aeronáuticas e aeroespaciais (aviões, helicópteros, satélites e estações espaciais.) e marítimas (submarinos e navios). A motivação é tanto científica quanto econômica. Do ponto de vista científico, monitorar e detectar danos estruturais significa conquistar um elevado grau de segurança. Do ponto de vista econômico, sistemas com essa capacidade permitem uma economia significativa em manutenção

Em geral, a integridade é a condição da estrutura que permite a sua operação adequada com desempenho satisfatório; monitoramento é o processo de diagnóstico e prognóstico; e dano é uma falha material, estrutural, ou funcional que afeta o desempenho presente ou futuro da estrutura (Inman, 2005).

De acordo com (Rytter, 1993) existem 4 níveis na escala de avaliação de danos: Nível I, fornece apenas informações sobre a presença do dano na estrutura; Nível II, aumenta o conhecimento sobre os danos por determinação da localização; Nível III, é a extensão dos danos avaliados e o Nível IV, a quantificação dos danos.

Geralmente, os sistemas de SHM coletam os dados enquanto a estrutura está em condição dinâmica, por meio de excitação forçada em uma faixa de frequência mais sensível ao dano, sendo feita de forma controlada por atuadores como *shakers* e transdutores piezelétricos. Desse princípio, surgem as técnicas baseadas na Função de Resposta em Frequência (FRF). Assim, os sistemas de SHM consistem em redes de sensores para aquisição de dados gerenciados por processadores que executam algoritmos para avaliar as condições da estrutura, (Cortez, 2012).

As principais técnicas utilizadas em sistemas de SHM têm origem nos métodos da avaliação não destrutiva (NDE), tais como a EMI, a emissão acústica, a inspeção ultrasônica, a inspeção por raios-X, vácuo comparativo, ondas de Lamb, inspeção por partícula magnética, correntes e aquelas baseadas em fibra óptica, (Sohn et al., 2004).

A técnica da EMI é uma forma de avaliação não destrutiva (NDE) baseada na Função de Resposta em Frequência (FRF) que se destaca por

sua simplicidade e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo. Esses transdutores, geralmente cerâmicas de PZT são colados na estrutura a ser monitorada por meio de um adesivo de alta rigidez que pode ser uma cola instantânea a base de cianoacrilato ou uma resina de epóxi. Para a compreensão do princípio dessa técnica é necessário um estudo desses dispositivos que tem como propriedade fundamental o efeito piezelétrico

O efeito piezoelétrico é o surgimento de um campo elétrico em um material submetido a uma distribuição de tensão mecânica. Também ocorre o efeito inverso, isto é, ao se aplicar uma tensão elétrica entre os dois lados de um material piezelétrico, surge uma deformação mecânica.

Os transdutores ativos de pastilha piezoelétrica são normalmente construídos a partir de cerâmica de PZT. Para pequenas mudanças nos parâmetros mecânicos e elétricos, a teoria linear da piezeletricidade é aplicável e a cerâmica piezoelétrica é descrita pelo seguinte par de equações em notação tensorial (Meitzler, 1987):

$$D_j = d_{jkl}T_{kl} + \epsilon_{jk}^T E_k \quad (1)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) definem uma relação entre a deformação mecânica S_{ij} , a tensão mecânica T_{kl} , o campo elétrico E_k e o deslocamento elétrico D_j , que são acoplados através do coeficiente de elasticidade s_{ijkl}^E medido com campo elétrico zero ($E = 0$), da permissividade dielétrica ϵ_{jk}^T medida com tensão mecânica nula ($T = 0$) e do coeficiente piezelétrico d_{kij} . Em geral, a representação tensorial nas Equações (1) e (2) resulta em nove equações correspondentes aos componentes de deformação mecânica e direções de polarização respectivas. A simplificação das equações constitutivas é obtida considerando particularidades do material piezelétrico e sua interação com a estrutura a ser monitorada.

O transdutor de PZT é alimentado por um campo elétrico alternado de valor fixo que excita e induz vibrações na estrutura (efeito piezelétrico inverso). A vibração resultante gera um fluxo de corrente no transdutor (efeito piezelétrico direto). Devido ao efeito piezelétrico, é estabelecida uma relação entre as propriedades mecânicas da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Logo, é possível monitorar variações dessas propriedades através da medição da impedância elétrica (Cawley, 1984).

Um modelo em termos da impedância elétrica do transdutor é dada, de acordo com (Liang et al., 1994), pela seguinte equação:

$$Z_E(\omega) = \frac{V}{I}$$

Onde V representa a tensão de entrada, I é a corrente de saída do transdutor piezelétrico. Além do mais, a é uma constante geométrica, e d_{3x} , \hat{Y}_{xx}^E y ε_{33}^T , são a constante de acoplamento piezelétrico, módulo de Young, e a constante dielétrica complexa do transdutor piezoelétrico a uma tensão constante, respectivamente.

De acordo com a Equação (3), qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura provocada por um dano implica em uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor. Portanto, a técnica da EMI permite que a integridade da estrutura seja avaliada de uma maneira simples através da medição da impedância elétrica do transdutor de PZT.

3 Método da Impedância de baixo Custo

O sistema usado para fazer as medições da impedância foi desenvolvido na plataforma LabVIEW por (Baptista and Vieira Filho, 2009). A escolha do sistema foi motivada por sua rapidez, sensibilidade e precisão, as quais foram demonstradas e comparadas usando um analisador de impedância comercial da Hewlett Packard. O diagrama de blocos da Figura 1 representa o sistema geral. Neste caso, os seguintes equipamentos e componentes foram utilizados:

- Dispositivo DAQ multifuncional USB-6259 da National Instruments.
- Software LabVIEW 2010 v10.0, versão para avaliação.
- Software Impedance Analyzer 2.0 para medição da impedância baseado na plataforma LabVIEW, desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2009).
- Microcomputador notebook Dell Inspiron 14 core i5 - 4 GB com Windows 7.
- Resistor de filme carbono: $R_s = 1k^1$

Figura 3: Tubulação.



Fonte: Arquivo pessoal.

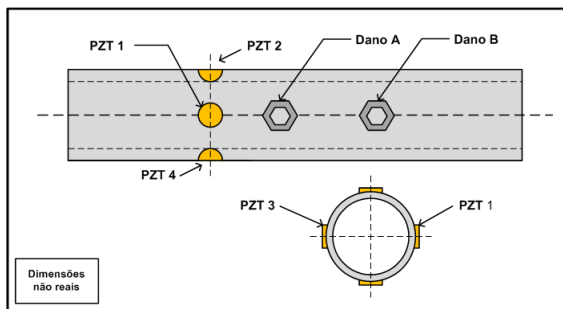
Para as estruturas, a faixa de frequência selecionada foi obtida de forma empírica. Para a primeira estrutura, as frequências entre 60-90 kHz foram selecionadas de uma faixa de análise de 30-160 kHz devido à sensibilidade na detecção do dano. Dentro desta faixa selecionada são analisadas duas faixas principais que são de 63-71 kHz e de 85-73 kHz. Para a segunda estrutura as frequências entre 68-76 kHz foram as que apresentaram melhores resultados.

4.1 Testes sem Fluxo

Este primeiro teste foi realizado com o tubo para os quatro transdutores foram simulados dois danos (mudança de massa) colando uma porca primeiro a 10 cm (Dano A), a 25 cm (Dano B), após à simulação dos danos foi tomada uma nova media considerada como integra.

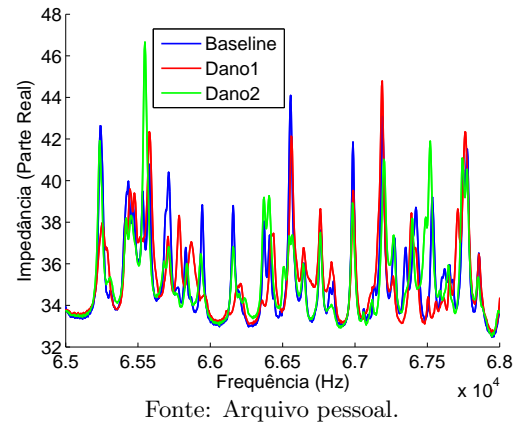
Nas Figuras 5 e 6 observam-se uns exemplos das medidas da parte real da impedância tomadas do PZT1 (ver Figura 4). A primeira medida em uma faixa de frequências de 65-68 kHz e a segunda medida em uma faixa de frequências de de 77-80 kHz.

Figura 4: Níveis de danos para o primeiro teste.



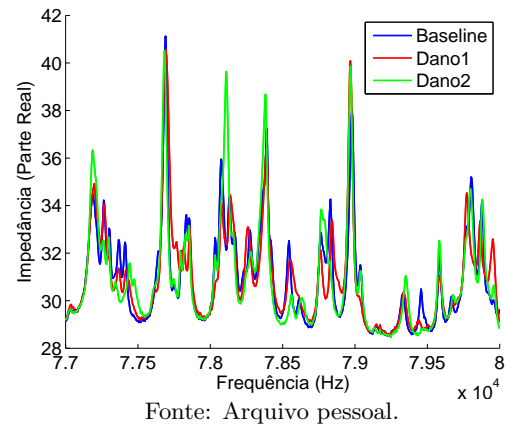
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5: Parte real da impedância em uma faixa de frequências de 65-68 kHz.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 6: Parte real da impedância em uma faixa de frequências de 77-80 kHz.



Fonte: Arquivo pessoal.

A identificação do dano é feita comparando-se a impedância elétrica do transdutor medida com a estrutura em uma condição inicial, considerada íntegra, com a impedância medida após a estrutura ter sofrido um possível dano.

Essa comparação é realizada por meio de índices de falha métrica. Os índices mais usados na literatura são o desvio da raiz média quadrática, RMSD (Root Mean Square Deviation), e a métrica do desvio do coeficiente de correlação, CCDM (Correlation Coefficient Deviation Metric).

O índice RMSD pode ser calculado através da equação (4) (Rogers, 1998),

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_n - I_0)^2}$$

$$_{CCDM} = \left| 1 - \frac{\sum_n^N (z_{n,h} -$$

5 Conclusões

Os resultados mostram que a presença de danos foi corretamente identificada/detectada. As medições de referência eram reprodutíveis e a presença de danos causaram maiores alterações na impedância do que nas variações das medições de referência. O mesmo foi considerado no caso de danos menos graves. No teste três, quando foi realizada uma fenda na estrutura, a métrica aumentou em duas ordens de magnitude.

Dos casos considerados aqui, uma conclusão clara pode ser realizada em relação à localização e à quantificação dos danos. A eficiência das medições da impedância para a gama de frequência selecionada depende da localização dos transdutores no sistema.

Uma abordagem para a identificação de danos estruturais em tubulações foi apresentada neste trabalho. Este método baseia-se na utilização de PZT de cerâmica de baixo custo e da técnica baseada na impedância electromecânica, foi utilizado para detectar e localizar danos na seção principal da tubulação com eficiência. Os resultados mostram que a variação na tubulação pode ser detectada numa gama de frequência elevada, mesmo para pequenos danos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo financiamento parcial deste trabalho, através do INCT-EIE.

Referências

- Baptista, F. G. and Vieira Filho, J. (2009). A new impedance measurement system for pzt-based structural health monitoring, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement* **58**(10). DOI: [10.1109/TIM.2009.2018693](https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2018693)
- Bhalla, S., Naidu, A. S. K. and Soh, C. K. (2003). A influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for nde., *International Conference On Smart Materials Structures and Systems* **IV**(5062): 263–269.
- Cawley, P. (1984). The impedance method of non-destructive inspection, *NDT International* **17**(2): 59–65. DOI: [10.1016/0308-9126\(84\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(84)90045-2)
- Cortez, N. E. (2012). Desenvolvimento e implementação de um sistema para detecção de falhas em estruturas usando micro-controlador, *Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, FEIS/UNESP*.

- Inman, D. J. (2005). *Damage prognosis: for aerospace, civil and mechanical systems*, Los Alamos: Los Alamos National Laboratory Report.
- Liang, C., Sun, F. P. and Rogers, C. A. (1994). Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems- determination of the actuator power consumption and system energy transfer, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **5**(1): 12–20. DOI: [10.1177/1045389X9400500102](https://doi.org/10.1177/1045389X9400500102)
- Marqui, C. R., Bueno, D., Vierira Filho, J., Santos, R. B. and Lopes Junior, V. (2008). External disturbance effect in damage detection using electrical impedance, *International Modal Analysis Conference* **26**(256).
- Meitzler, A. H. (1987). Ieee standard on piezoelectricity : an american national standard, *New York: IEEE-ANSI Std* **176**: 66.
- Rogers, C. A. (1998). Recent advancements in the electro-mechanical (e/m) impedance method for structural health monitoring and nde, *Annual International Symposium On Smart Structures And Materials* **3329**: 536–547.
- Rytter, A. (1993). Vibration based inspection of civil engineering structures, *Thesis (Philosophical Doctor)- Dep. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark*.
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W. and Nadler, B. R. (2004). *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*, Los Alamos: Los Alamos National Laboratory Report.