

# Monitoreo de salud estructural de aeronaves basado en mediciones de impedancia electromecánica

Lizeth Vargas Palomino<sup>1\*</sup>, Valder Steffen Jr<sup>\*\*</sup>, Roberto Mendes Finzi Neto<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG-Brasil, \*[lpalomino@mecanica.ufu.br](mailto:lpalomino@mecanica.ufu.br), \*\*[vsteffen@mecanica.ufu.br](mailto:vsteffen@mecanica.ufu.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO-Brasil, \*[finzi@eee.ufg.br](mailto:finzi@eee.ufg.br)

*Fecha de recepción del artículo: 1/6/2011 Fecha de aceptación del artículo: 1/7/2011*

## Resumen

Se denomina Monitoreo de Salud Estructural al proceso de detección de anomalías (daños o degradación) en varias áreas de ingeniería, tales como, aeroespacial, civil y mecánica, principalmente. Una de las técnicas utilizadas para monitorear la integridad de una estructura es basada en la medición de impedancia electromecánica. Esta técnica monitorea la variación de impedancia mecánica de una estructura, causada por la existencia de uno o más daños, por medio de la medición de la impedancia eléctrica de las pastillas de material piezoeléctrico acopladas en la superficie de la estructura. La impedancia eléctrica de las pastillas piezoeléctricas está directamente relacionada con la impedancia mecánica de la estructura, es por eso que a partir de la variación de las señales de impedancia medidas se puede concluir la presencia o no de un daño. La cuantificación del daño se hace por medio de una métrica que es especialmente definida para atribuirle un valor escalar característico. En el marco del proyecto de investigación en convenio con la EMBRAER, la Universidad Federal de Uberlândia (UFU), estudia la viabilidad del uso de la técnica de Monitoreo de Salud Estructural basada en mediciones de impedancia electromecánica como una herramienta de detección de daños incipientes en lugares de difícil acceso en aeronaves. El presente trabajo presenta los resultados obtenidos en la UFU para la consolidación de esta herramienta, los cuales a pesar de encontrarse todavía en aplicaciones

a nivel de laboratorio han mostrado un gran potencial para la detección de daños incipientes en estructuras aeronáuticas, tales como, pérdida de un remache y fisuras. En este trabajo también será descrito un sistema de medición de impedancia electromecánica desarrollado en la UFU.

## Palabras clave

Detección de Daños (Damage Detection), Impedancia Electromecánica (Electromechanical Impedance), Material Piezoeléctrico (Piezoelectric Material), Monitoreo de Salud Estructural (Structural Health Monitoring), Medición de Impedancia (Impedance measurement).

## Abstract

The structural Health Monitoring (SHM) is the process of damage detection in many areas of engineering, like aerospace, civil and mechanics. One of SHM techniques is based on the electromechanical impedance measurement. This technique monitors the mechanical impedance variation of the structure, caused by the presence of damage, through measurements of the electrical impedance signal of the piezoelectric material bonded on the surface of the monitored structure. As the electrical impedance of the PZT patches is directly related to the mechanical impedance of the structure, the impedance measurements can be used for damage detection. The quantification of the damage is done by a metric, which is attributed a characteristic scalar

value. In this context, the project developed by Federal University of Uberlândia with partnership with EMBRAER, studied the feasibility of the structural health monitoring technique based on the electromechanical impedance measurements to detect incipient damage at inaccessible location in the airplane. This paper presents the results of this technique obtained by UFU for the consolidation of this tool. Despite the method is still applied in laboratory scale applications, it has shown a great potential to detect incipient damage in airplanes' structures, like a rivet loss and cracks. This works also describes an impedance measurement system developed at UFU.

## Keywords

Damage Detection, Electromechanical Impedance, Piezoelectric Material, Structural Health Monitoring, Impedance measurement.

## Introducción

Daños que se presenta normalmente en equipos industriales y en estructuras en general pueden estar asociados a fricción, fatiga, impacto, fisuras y corrosión, entre otras razones. Para un adecuado funcionamiento del sistema, el daño debe ser ubicado y reparado, oportunamente. Detectar una anomalía en el sistema consiste en ubicar, cuantificar y estimar la vida útil restante del sistema. Uno de los procesos más ambiciosos de la Ingeniería moderna es el monitoreo de salud estructural en tiempo real de componentes de elevado costo o de grande responsabilidad para el sistema considerado. De esta forma, la creación o perfeccionamiento de técnicas que amplíen la precisión y confiabilidad del proceso de monitoreo son altamente deseables, siendo objeto de varios estudios tanto en el medio industrial cuanto en el medio académico [1].

Existen varias técnicas destinadas al monitoreo de la presencia y propagación de daños estructurales. Una de estas técnicas es basada en la medición de impedancia electromecánica [2]. Esta técnica se basa en el acoplamiento electromecánico que resulta de

unir un transductor piezoeléctrico a la estructura monitoreada, quedando definida la función de impedancia que depende tanto de las características eléctricas del transductor como de las características físicas o mecánicas de la estructura. Así, a través de curvas características de la impedancia y su variación debida a la ocurrencia de un daño, este puede ser evaluado. Para cuantificar el daño se utiliza una métrica obtenida con herramientas estadísticas por medio de la cual se hace una comparación entre las mediciones para los casos sin daño, llamado de *baseline*, y las mediciones con daño[3].

En el marco del proyecto de investigación en convenio con la EMBRAER, la Universidad Federal de Uberlândia (UFU), estudia la viabilidad del uso de la técnica de Monitoreo de Salud Estructural basada en mediciones de impedancia electromecánica como una herramienta de detección de daños incipientes en lugares de difícil acceso en aeronaves, como es la parte interna del fuselaje de un avión. Este trabajo presenta los resultados obtenidos aplicando esta técnica en un panel aeronáutico. Aunque, estas aplicaciones están a nivel de laboratorio muestran un gran potencial para la detección de daños incipientes en estructuras aeronáuticas, tal como la pérdida de un remache. En este trabajo también será descrito un sistema de medición de impedancia electromecánica desarrollado en la UFU.

## Monitoreo de salud estructural basado en impedancia electromecánica

El método de monitoreo de salud estructural basado en impedancia electromecánica, utiliza sensores de impedancia para monitorear alteraciones causadas por los daños en las propiedades mecánicas de la estructura analizada. El sensor de impedancia consiste en una pequeña pastilla piezoeléctrica, usualmente de PZT (zirconato titanio de plomo) que tiene un tamaño inferior a 25x25x0,1mm, que será utilizada para medir directamente la respuesta dinámica local. Además de ser sensor, la pastilla piezoeléctrica cumple la función de actuador.

Este método fue propuesto inicialmente por Liang *et al.*[4] y fue extendido por Chaudhry *et al.*[5,6], Sun *et al.*[7], Park *et al.* [8,2], , Soh *et al.* [9], Bhalla *et al.* [10] Giurgiutiu *et al.* [11] Moura and Steffen [12], Peairs [13], Moura [14] and Neto *et al.* [15].

Los materiales piezoeléctricos actúan directamente produciendo una tensión eléctrica cuando sufren una deformación mecánica, e inversamente, una deformación mecánica es producida cuando es aplicado un voltaje [16]. Para obtener la lectura de la impedancia electromecánica de la estructura, la técnica utiliza simultáneamente los efectos, directo e inverso, de los materiales piezoeléctricos. Cuando un potencial eléctrico alternado actúa en la pastilla de PZT pegada en la estructura, esta se deforma conjuntamente con la estructura, haciendo que el conjunto comience a vibrar. Si la frecuencia de excitación es muy alta, la respuesta dinámica de la estructura refleja apenas el comportamiento de una pequeña región próxima al sensor [17]. A partir de la respuesta dinámica de la estructura, la pastilla de PZT se deforma generando un potencial eléctrico. Así, la pastilla de PZT funciona simultáneamente como actuador y como sensor de deformaciones. Cuando algún tipo de daño aparece en la estructura, su respuesta dinámica es alterada y percibida a través de la señal de impedancia de la pastilla de PZT. El modelo electromecánico que cuantifica y describe el proceso es presentado en la Figura 1.

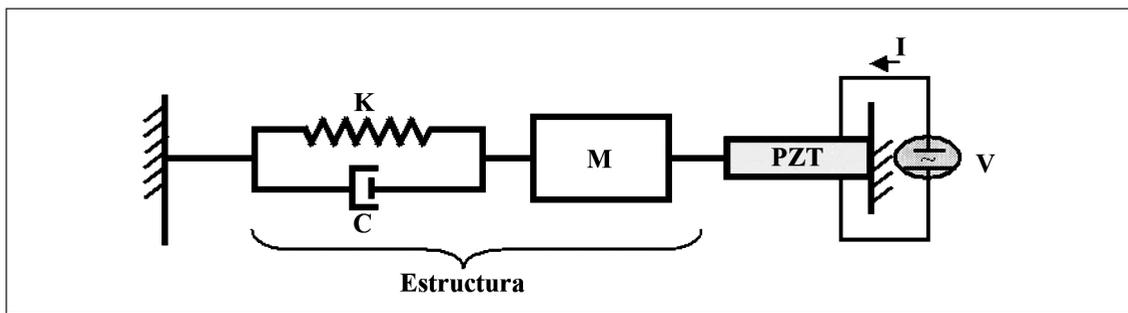
La Ec. (1) es la solución del sistema de un grado de libertad, en términos de la admitancia eléctrica, en función de la frecuencia [4]. Esta ecuación

indica que la impedancia eléctrica del PZT está directamente relacionada con la impedancia mecánica de la estructura. Los daños en la estructura ocasionan cambios en la rigidez, en la masa y/o en el amortiguamiento del sistema, alterando las características dinámicas locales.

$$(1) Y(\omega) = i\omega a \left( \bar{\epsilon}_3^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_x^E \right)$$

Donde,  $Y(\omega)$  es la admitancia eléctrica,  $Z_a$  es la impedancia mecánica de la pastilla de PZT,  $Z_s$  es la impedancia mecánica de la estructura,  $\hat{Y}_{xx}^E$  es el modulo complejo de Young de la pastilla de PZT con campo eléctrico 0,  $d_{3x}$  es la constante de acoplamiento de la pastilla de PZT en la dirección  $x$  con deformación 0,  $\epsilon_{33}^T$  es la constante dieléctrica con deformación 0,  $\delta$  es la constante dieléctrica de la pastilla de PZT y  $a$  es la constante geometría de la pastilla de PZT.

La sensibilidad de la técnica para detectar daños está relacionada con la banda de frecuencia seleccionada. Un daño muy pequeño en la estructura no genera mayores cambios en las propiedades de rigidez y de amortiguamiento, por eso es necesaria una amplitud de onda de excitación pequeña para poder detectar el daño. El rango de frecuencia típicamente usado en este método es de 10 kHz a 250 kHz, aunque algunos autores trabajan con frecuencias más bajas. El rango de frecuencia es determinado por el método de prueba y error. Un rango de frecuencia alto (entorno de 150 kHz) es favorable para detectar la localización de los daños,



**Figura 1.** Modelo unidimensional del acoplamiento electromecánico utilizado por el método basado en la impedancia.

y un rango bajo (menor de 70kHz) detecta regiones en las que están localizados los daños.

La respuesta en frecuencia que presenta la impedancia permite una evaluación cualitativa del daño. Para tener una evaluación cuantitativa se usa una escala métrica [3]. En este trabajo fue usada la desviación media de la raíz cuadrada (RMSD), dada por la Ec. (2), con esta función es asociado un número al daño.

$$(2) \quad M = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Re(Z_{i,1}) - Re(Z_{i,2})}{Re(Z_{i,1})} \right)^2}$$

Donde  $M$  es definida como la métrica de daño,  $Re(Z_{i,1})$  representa la parte real de la impedancia medida con la estructura sin daño (baseline),  $Re(Z_{i,2})$  representa la parte real de la señal a ser comparada con el baseline, y  $n$  indica el número de frecuencias en el rango de evaluación.

## Medición de la impedancia electromecánica

En el laboratorio las señales de impedancia son medidas con un analizador de impedancia comercial. En el caso específico del laboratorio de Mecánica de estructuras Prof. José Eduardo Tannús Reis (LMEst) de la UFU, se utiliza el analizador de impedancia HP4194A (Fig. 2) que tiene once funciones de medición de impedancia y trabaja en un rango de 100 Hz até 40 MHz.

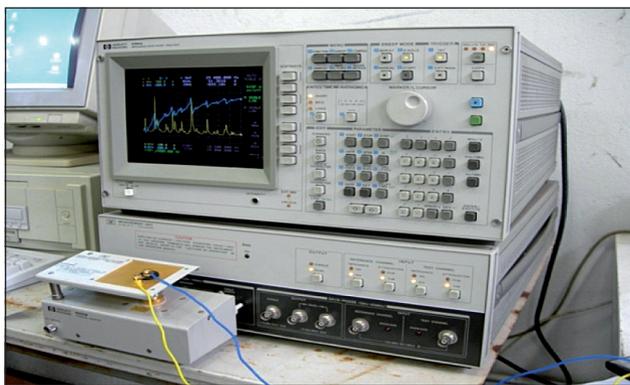


Figura 2. Analizador de impedancia (HP4194A)

Una de las desventajas de este equipo es que no es portátil lo que imposibilita su utilización en aplicaciones industriales. Un ejemplo es el de las estructuras aeronáuticas, que poseen serias restricciones de peso y volumen de los equipos que pueden ser embarcados. Además los analizadores de impedancia comerciales poseen un costo elevado (cerca de US\$ 40 mil) y en el caso específico del monitoreo de la salud estructural, apenas la función R-X (Parte real e imaginaria de la impedancia) es utilizada.

Por esto algunas alternativas han sido propuestas con el objetivo de substituir el uso de equipos como el HP4194A. Peairs *et al.* [18] proponen una versión de bajo costo para medir impedancia utilizando un analizador de señales de FFT y una resistencia *shunt* asociada a un amplificador operacional para medir la corriente de la pastilla de la PZT. Con este sistema, la magnitud y la fase de la impedancia pueden ser usadas para calcular la parte real de la impedancia de la pastilla de PZT en un amplio rango de frecuencias. La principal desventaja de este método es la limitación del rango de la frecuencia de excitación impuesta por la frecuencia de muestreo del analizador de señales, lo cual causa errores en la medición de la fase. Este trabajo viene siendo extendido por varios grupos de investigación. Xu y Giurgiutiu [19] proponen el uso de una señal de excitación de frecuencia *swept* con espectro de energía constante para optimizar el tiempo requerido para la adquisición y procesamiento de los datos. Filho y Baptista [20] continuaron con este trabajo, pero con una variación, utilizaron una señal de excitación de frecuencia *chirp*, obteniendo buenos resultados. Todas estas soluciones son basadas en algoritmos de FFT implementadas en analizadores de señales o en computadores personales con una placa de adquisición (con valores entre los US\$5.000 a US\$10.000).

Implementaciones usando DSP y algoritmos de FFT son más económicas, pero son menos eficientes con respecto al tiempo de procesamiento requerido cuando son comparadas con soluciones implementadas usando computadores o

analizadores de señales. Además de las técnicas basadas en FFT, existen algoritmos basados en ajustes de curvas. Radil *et al.* [21] propone un método preciso para medir impedancia. En baja frecuencia de muestreo, los autores consiguen reconstruir el voltaje de excitación y la corriente, con esto puede ser calculado la amplitud y la fase de la impedancia con exactitud y estabilidad (error menor de 1%). Este sistema toma 1,7s para calcular la amplitud y la fase en cada punto de frecuencia, consecuentemente, para la construcción de una señal completa de impedancia con 400 puntos de frecuencia tomaría 680s. Ramos *et al* [22] propone un algoritmo basado en ajuste de curva elíptico siendo más preciso, estable y rápido que el algoritmo basado en ajuste de curva.

La propuesta presentada en este trabajo para medir impedancia electromecánica en el monitoreo de salud estructural en estructuras aeronáuticas es una alternativa que tiene una topología híbrida basada en la propuesta presentada por Finzi *et al.*[23], en la cual tanto Hardware como Software son combinados para obtener mediciones de amplitud y fase de la impedancia de cada pastilla de PZT. La

Fig.3(a) ilustra la arquitectura propuesta. La fase y la corriente de la pastilla de PZT son medidas a través de un hardware especialmente desarrollado, y la parte real de la impedancia es calculada por un software implementado en un DSP (Fig. (3b)). Las principales ventajas de este método son: (a) Los cálculos realizados en el software del DSP son reducidos a  $N$  ( $N$  es el número de puntos de frecuencia); (b) La corriente puede ser medida con una frecuencia de muestreo baja, independientemente de la frecuencia de excitación; (c) La fase es medida digitalmente usando dos contadores del DSP.

Este sistema es dividido en tres circuitos principales: (1) Sistema multiplexador; (2) Acondicionamiento de señal y medición; (3) DSP [15]. El algoritmo del software desarrollado en el DSP se presenta en el diagrama de flujo de la Fig 3(b).

### Prototipo y resultados experimentales

Un prototipo para 16 pastillas de PZT fue construido para probar y evaluar la arquitectura propuesta. En la Figura 4 se puede observar el sistema; comparado el tamaño que tiene con un esférico.

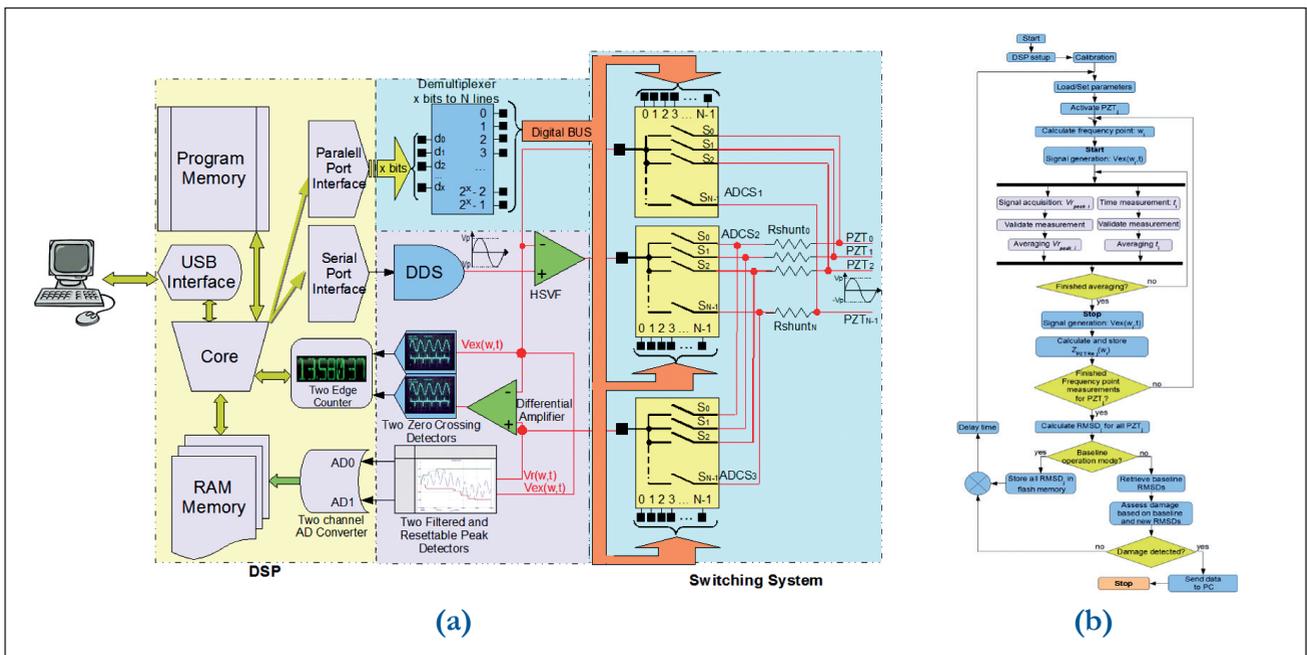


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de medición de impedancia propuesto: (a) Circuitos; (b) Software.

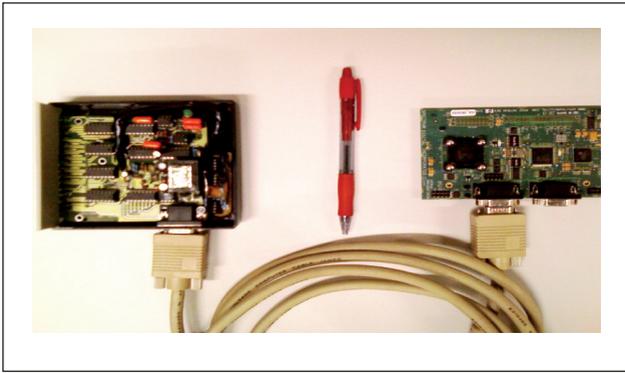


Figura 4. Prototipo del Sistema propuesto.

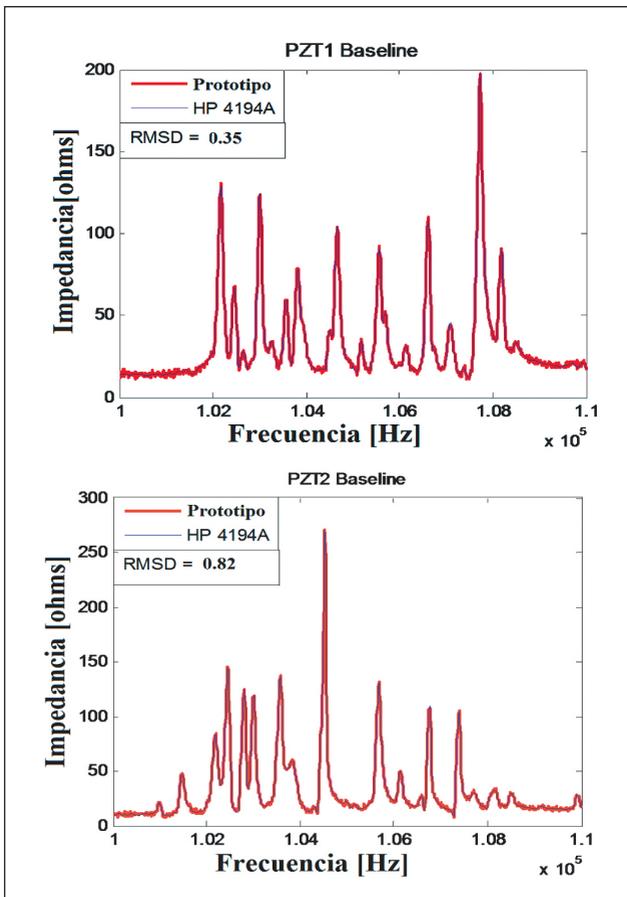


Figura 5. Señales de impedancia medidos con el analizador de impedancia HP4194A y el sistema propuesto.

Fue utilizado el analizador de impedancia HP4194A como referencia para verificar la estabilidad, exactitud y sensibilidad del sistema propuesto. Utilizando un cuerpo de prueba con dos pastillas de PZT acopladas en la superficie, llamadas de

PZT1 y PZT2 respectivamente, fueron medidas las señales de impedancia con los dos sistemas. Cada señal contenía 401 puntos de frecuencia. Los resultados son presentados en la Fig.5, donde se observa claramente la igualdad existente. Cuando se calcularon los valores de métrica, los bajos valores confirman la semejanza existente entre las señales obtenidas con los dos sistemas.

La exactitud y la estabilidad del sistema propuesto será demostrada en la siguiente donde se muestra la aplicación a una estructura aeronáutica.

### Monitoreo de Salud Estructural en estructuras aeronáuticas

Una vez desarrollado un sistema de medición de impedancia portátil, procedemos a aplicar la técnica de monitoreo de salud estructural basada en impedancia electromecánica a una estructura aeronáutica en laboratorio. En la Fig. 6(a) se observa un panel aeronáutico remachado de aluminio, cuyas dimensiones son 80x80cm. La estructura fue instrumentada con 5 pastillas de PZT de las cuales: 2 eran cuadradas de 15x15x0,1 mm (PZT3 y PZT4) y 3 redondas con diámetro de 15mm y espesura de 0,1mm (PZT1, PZT2 y PZT5) [24], los modelos de pastillas se observan en la Fig.6(b).

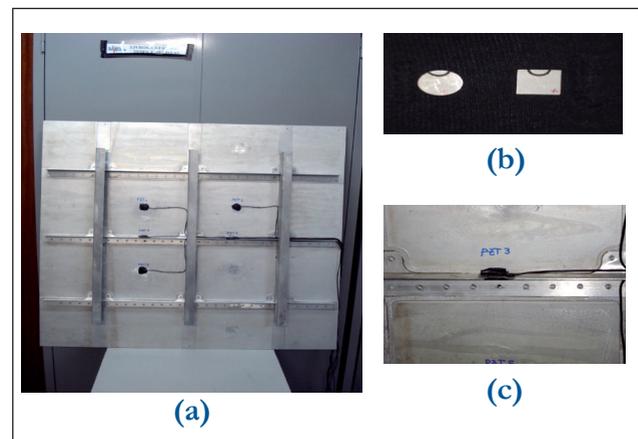


Figura 6. (a) Panel Aeronáutico; (b) Pastillas de PZT; (c) Daño inserido.

Para simular un daño fue retirado un remache cerca del PZT3 como muestra la Fig. 6(c). Fueron medidas

las señales de impedancia para las 5 pastillas de PZT, tanto cuando la estructura estaba con los remaches completos como cuando fue retirado el remache. Fueron tomadas 10 mediciones para cada uno de los dos estados de la estructura. Las señales medias de cada PZT son presentadas en la Fig.7.

Es clara la diferencia que existe entre las señales sin daño y las señales con daño en las pastillas 1,3 y 5. En cuanto a la pastilla de PZT2 la señal cambio poco, esto puede ser debido a que se encuentra más lejos del daño insertado.

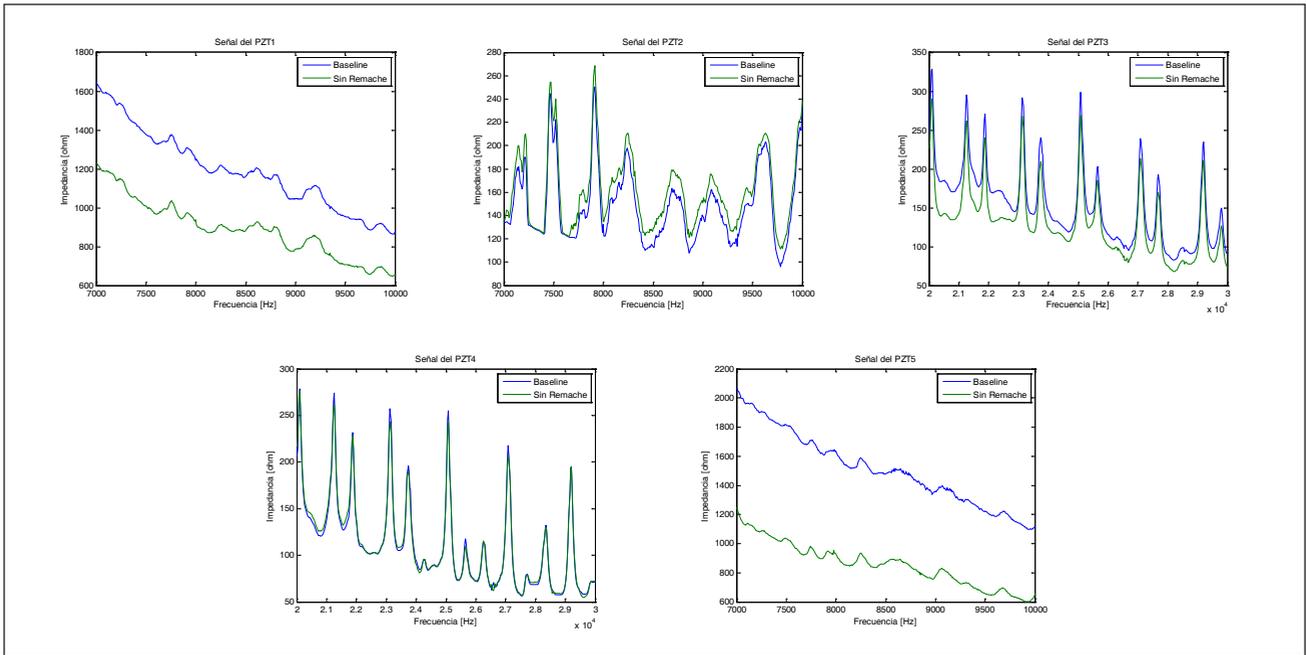


Figura 7. Señales de los sensores de impedancia del panel aeronáutico.

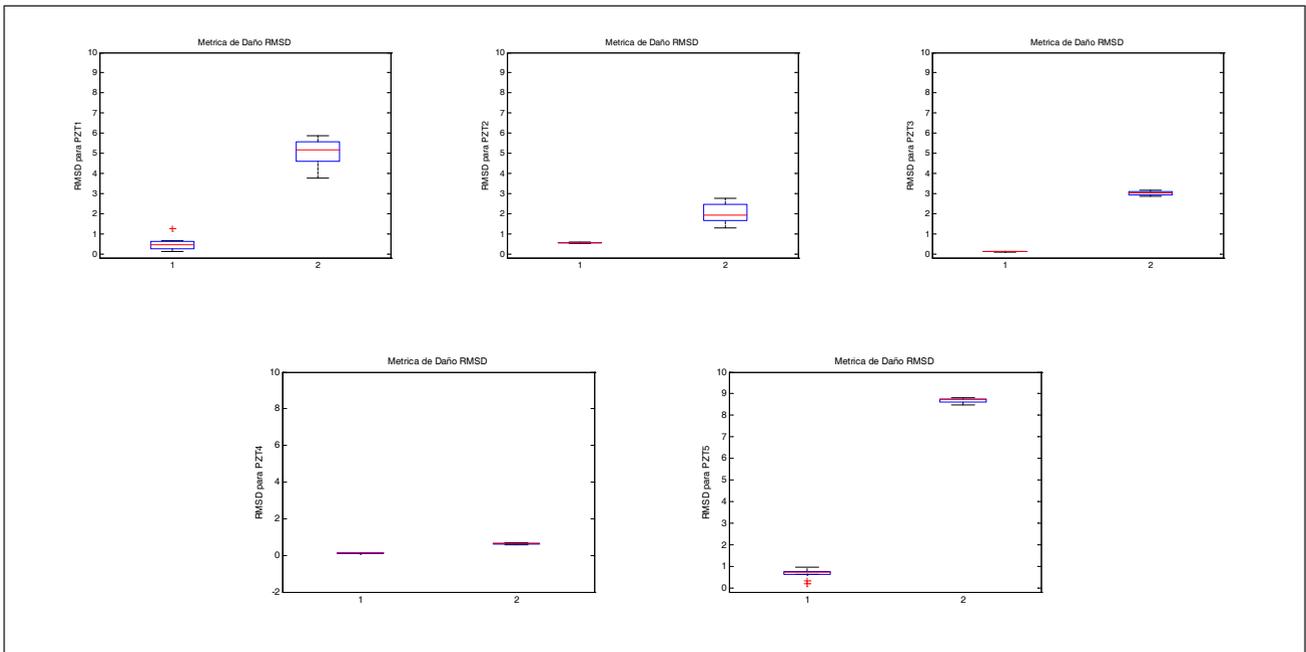


Figura 8. Diagrama de cajas de las métricas de daño de los sensores de impedancia del panel aeronáutico.

En la Fig. 8 podemos observar los resultados obtenidos al calcular la métrica de daño. Observamos dos cajas en cada grafico, la primera representa las métricas de daño obtenidas de las señales medidas cuando el panel tenía todos los remaches y la segunda caja representa los valores obtenidos con las mediciones hechas después del daño. La línea roja representa la media y la caja azul representa la desviación estándar de los valores obtenidos.

## Discusión

En este trabajo fue presentado el método de monitoreo de salud estructural basado en mediciones de impedancia electromecánica aplicado a una estructura aeronáutica, con el fin de evaluar el funcionamiento de esta técnica para futuras aplicaciones reales en la industria aeronáutica.

El primer desafío que se tiene al intentar aplicar la técnica en estructuras reales, es medir la impedancia electromecánica de las estructuras, es por esto que en este trabajo se describe un sistema alternativo de medición de impedancia basado en arquitectura para múltiples sensores/actuadores piezoeléctricos. Esta propuesta ofrece estabilidad, confiabilidad, bajo costo y flexibilidad en el número de sensores/actuadores. Fue mostrado que la señal de impedancia obtenida con este sistema es similar a la obtenida por un sistema clásico de medición de impedancia como es el analizador de impedancia.

Con un sistema de medición de impedancia portátil se procedió a aplicar el método de impedancia electromecánica en una estructura aeronáutica. Fueron acoplados, 5 sensores para monitorear la pérdida de un remache. En la placa fueron acoplados sensores redondos y en las vigas de refuerzo sensores cuadrados, ya que son los formatos de pastillas de PZT que tienen mejores resultados respectivamente [24]. Cuando fue retirado el remache se pudo observar que todos los sensores detectaron la falta del mismo. El PZT5 fue el que tuvo mayor variación lo cual se debe posiblemente a que se encuentra en la placa y su vibración está en la misma dirección del daño. Ya el

PZT3 que se encuentra en la viga de refuerzo tuvo menor sensibilidad aunque se encontraba más cerca del remache retirado, con respecto a esto podemos resaltar que su vibración estaba a 90 grados del daño. El PZT4 fue el que menos sensibilidad tuvo, este se encontraba en la viga de refuerzo y lejos de el daño inserido.

## Agradecimientos

El primer autor agradece a CNPq por su beca de estudios. Los autores agradecen a FAPEMG y CNPq por el apoyo financiero de las investigaciones desarrolladas en el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Estructuras Inteligentes en Ingeniería (INCT-EIE).

## Referencias

1. C.R. Farrar, N.A.J. Lieven y M.T. Benent, An Introduction to Damage Prognosis, Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System, Cap.1, Wyle, Inglaterra, pp.1-12, 2005.
2. G. Park y D.J. Inman, Impedance-Based Structural Health Monitoring, Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System, Cap.13, Wyle, Inglaterra, pp.275-292, 2005
3. L.V. Palomino y V. Steffen Jr, Damage Metrics Associated with Electromechanical Impedance Technique for SHM Applied to a Riveted Structure, Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Brazil, 2009.
4. C. Liang, F.P. Sun y C. A. Rogers, Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material System – Determination of actuator Power Consumption and System Energy Transfer, Journal of Intelligent Materials System and Structures, Vol.5, pp.12-20, 1994.
5. Z. Chaudhry, T. Joseph, F. Sun, y C. Rogers., Local-Area Health Monitoring of Aircraft

- via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches, Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference, San Diego, CA, Proceedings of the SPIE. 2443, 1995.
6. Z. Chaudhry, F. Lalande, A. Ganino, y C. Rogers, Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors, AIAA-1996-1074-CP, 1996.
  7. F.P. Sun, Z. Chaudhy y C. Liang, Rogers, C.A., Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, pp.134–139, 1995.
  8. G. Park, K. Kabeya, H.H. Cudney, y D. J. Inman, Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications, JSME International Journal, Vol. 42(2), pp. 249–258, 1999.
  9. C. K. Soh, K. Tseng, S. Bhalla, y A. Gupta, Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge, Smart Materials and Structures, Vol. 9, pp. 533–542, 2000.
  10. S. Bhalla, A.S.K. Naidu, C.W. Ong, and C.K. Soh, Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE, In Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart System, Melbourne, Australia, December 2002.
  11. V. Giurgiutiu, A.N. Zagrai, J. Bao, J. Redmond, D. Roach y K. Rackow, Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures, International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Vol. 6(1), pp. 3–21, 2003.
  12. J.R.V. Moura Jr. y V. Steffen Jr., Impedance-Based Health Monitoring for Aeronautic Structures using Statistical Metamodeling, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.17, pp. 1023-1036, 2006.
  13. D.M. Peairs, High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring”, PhD. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2006.
  14. J.R.V.A. Moura, Contribution to Structural Health Monitoring Systems Applied to Aeronautic and Space Structures”, PhD. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlandia, Brazil, 2008.
  15. R.M.F. Neto, R. M. F., V. Steffen, D.A. Rade, C.A. Gallo, y L.V. Palomino, A low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators, Structural Health Monitoring, Vol 1, 2010, pp. 1-1.
  16. C. Niezricki, D. Brei, S. Balakrishman y A. Moskalik, Piezoelectric Actuation: State of the Art, The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, pp. 269-280, 2001.
  17. J. P. Stoker y G.L. Cloud, The Application of interferometric technique to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials, Experimental Mechanics, Vol.33, pp.314-319, 1993.
  18. D.M. Peairs, G. Park, y D.J. Inman, Improving Accessibility of the Impedance-Based Structural Health Monitoring Method, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15(2):pp.129–139, 2004.
  19. B. Xu y V. Giurgiutiu, 2005 A Low-Cost and Field Portable Electromechanical (E/M) Impedance Analyzer for Active Structural Health Monitoring. in: Proc. 5th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, September 15–17, 2005.
  20. J. Filho y F.A. Baptista, New Impedance Measurement System for PZT Based Structural Health Monitoring, IEEE Transactions on Instrumentation & Measurements. Vol. 58(10), pp. 3602-3608, 2008.

21. T. Radil, P.M. Ramos, y A.C. Serra, Impedance Measurement With Sine-Fitting Algorithms Implemented in a DSP Portable Device. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. vol. 57(1), 2008.
22. P.M. Ramos, F.M. Janeiro y M. Tlemçan, Recent Developments on Impedance Measurements With DSP-Based Ellipse-Fitting Algorithms .IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58(5), 2009.
23. R.M. Finzi Neto, V. Steffen Jr.;D.A. Rade, C.A. Gallo, Proposal of a solid State Switching and Signal Conditioning System for Structural Health Monitoring Based on Piezoelectric sensors/ actuators.,PACAM XI - 11th Pan-American Congress of Applied Mechanics, Foz do Iguaçu, PR – Brazil, 2010
24. L. V. Palomino, K. M. Tsuruta, M. M. Sousa, D. A. Rade y V. Steffen Jr, Influência do formato das pastilhas cêramicas piezelétricas nas respostas do Método de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impêdancia Eletromecânica, Anais CONEM 2010, Campina Grande-PB, Brasil, 2010.