

# ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA TÉCNICA DE IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA APLICADA AO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Lorena Lopes Dias, [lorena.dias@unesp.br](mailto:lorena.dias@unesp.br)  
Camila Gianini Gonzalez-Bueno, [camila.gg.bueno@unesp.br](mailto:camila.gg.bueno@unesp.br)  
Douglas Domingues Bueno, [douglas.bueno@unesp.br](mailto:douglas.bueno@unesp.br)

GMSINT - Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) - Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, 56 - Ilha Solteira, SP - CEP 15.385-000

**Resumo.** Na engenharia é fundamental que todas as estruturas sejam capazes de desempenhar suas funções adequadamente. Portanto, diversos pesquisadores investigam técnicas responsáveis por diagnosticar a estrutura, sendo essa área conhecida como Monitoramento da Integridade Estrutural. Entre os métodos estudados, a técnica da Impedância Eletromecânica (IE) tem atraído a atenção devido aos seus resultados promissores no processamento de sinal em tempo real, além da relativa simplicidade e baixo custo dos piezoelétricos empregados. Entretanto, a sensibilidade das técnicas às variações das condições ambientais (externas) pode conduzir a falsos diagnósticos. Um dos fatores mais críticos para a técnica da Impedância Eletromecânica é a temperatura. Em vista disso, a presente pesquisa investiga a influência da temperatura em um sistema caracterizado pelo acoplamento de um piezoelétrico a uma barra metálica descrita pelo Método dos Elementos Espectrais. As curvas de IE foram obtidas por meio de simulações numéricas, a partir das quais concluiu-se que as variações das propriedades do piezoelétrico são responsáveis pelo deslocamento vertical das curvas de impedância eletromecânica, enquanto que a estrutura se desloca horizontalmente; ao analisar todo o sistema, observou-se a combinação desses dois efeitos.

**Palavras chave:** Monitoramento da integridade estrutural, Transdutor piezoelétrico, Impedância eletromecânica, Método dos elementos espectrais, Temperatura.

**Abstract.** In engineering it is essential that all structures are able to perform their functions properly. Therefore, several researchers investigate techniques responsible for diagnosing the structure, whose area is known as Structural Health Monitoring. Among the methods studied, the Electromechanical Impedance (IE) technique has attracted attention due to its promising results in real-time signal processing, in addition to the relative simplicity and low cost of the piezoelectrics employed. However, the sensitivity of the techniques to variations in environmental conditions (external) can lead to false diagnoses. One of the most critical factors for the Electromechanical Impedance technique is the temperature. In view of this, the present research investigates the influence of temperature in a system characterized by the coupling of a piezoelectric to a metallic bar described by the Spectral Elements Method. The IE curves were obtained by numerical computer simulations, from which it was concluded that the variations in the piezoelectric properties are responsible for the vertical displacement of the electromechanical impedance curves, while the structure displaces them horizontally; analyzing the entire system, a combination of these two effects was observed.

**Keywords:** Structural health monitoring, Piezoelectric transducer, Electromechanical impedance, Spectral element method, Temperature.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Monitoramento da integridade estrutural

O Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*) é uma área da engenharia responsável pelo estudo do diagnóstico da estrutura, sendo capaz de detectar danos ainda em estágios iniciais. Dessa forma, pode-se evitar inúmeros acidentes provocados em função da falha estrutural de algum equipamento. Segundo Farrar *et al.* (2005), trata-se da observação do sistema estrutural ao longo do tempo por meio da medição das respostas dinâmicas amostradas periodicamente de um conjunto de sensores, das quais extraem-se recursos sensíveis aos danos e, por fim, a análise estatística destes para determinar o estado atual do sistema. A longo prazo, é possível obter um diagnóstico

atualizado periodicamente sobre o estado de conservação da estrutura.

Na Figura 1, tem-se uma representação das etapas envolvidas no sistema SHM. A primeira consiste no acoplamento de sensores ao longo da estrutura, a partir dos quais obtém-se os dados necessários para a análise da mesma (etapa 2). A terceira etapa interpreta os sinais obtidos por meio da utilização de algum programa computacional, os quais determinam o diagnóstico da estrutura. A seguir, define-se qual será o plano de ação (etapa 4), i.e, se existe a necessidade de intercepção para impedir a propagação de algum defeito (etapa 5) ou se não é necessário nenhuma intervenção, reiniciando o ciclo (Louzada, 2019).

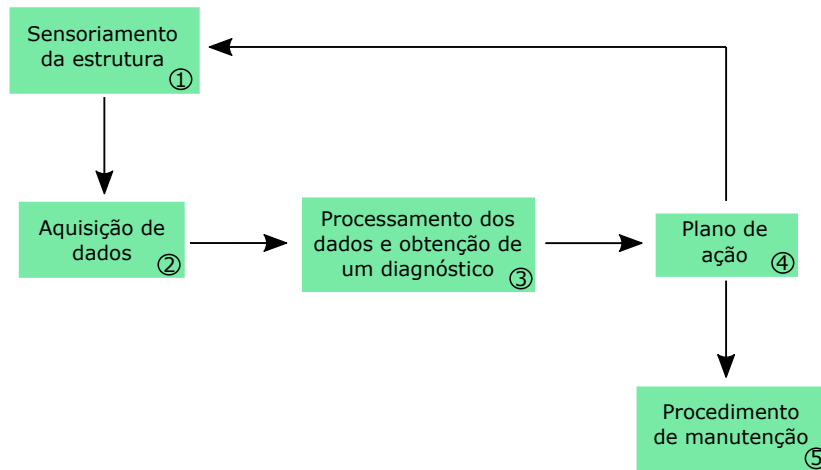


Figura 1. Principais etapas de um sistema SHM

## 1.2 Técnica da impedância eletromecânica

A técnica da Impedância Eletromecânica é caracterizada pela utilização de materiais inteligentes conhecidos como transdutores piezoelétricos, em especial as cerâmicas piezoelétricas ou PZT (do inglês, *Leads Zirconate Titanate*). Estes materiais são capazes de desenvolverem cargas elétricas quando sujeitos a esforços mecânicos (efeito direto), agindo como um sensor e, inversamente, sofrem deformações mecânicas quando estão sob a ação de um campo elétrico (efeito inverso), sendo esta propriedade relacionado à função de atuador (Tebaldi, 2014).

A técnica conhecida como Impedância Eletromecânica (IE) (ou EMI, do inglês *Eletromechanical Impedance*), também conhecida como *Impedance-based SHM*, teve como base o trabalho de Liang *et al.* (1993) e, desde então, diversas pesquisas exibem promissores resultados referentes a sua utilização, principalmente envolvendo o processamento de sinais em tempo real para a detecção de danos incipientes. Esta técnica baseia-se no efeito piezoelétrico, o qual é responsável pelo acoplamento eletromecânico entre a estrutura e o PZT nela instalado, sendo que este transdutor irá agir simultaneamente como atuador e sensor, os quais, respectivamente, excitam a estrutura monitorada e medem a resposta da mesma. Sua metodologia consiste, basicamente, em acoplar o piezoelétrico à estrutura e, então, verifica-se a presença de um eventual dano por meio do monitoramento das curvas da impedância elétrica do material piezoelétrico, a qual está associada a impedância mecânica da estrutura, sendo esta influenciada pela presença do dano. Usualmente, compara-se o sinal adquirido em um estado desconhecido da estrutura com o sinal obtido para a estrutura sem dano, *baseline*, e a partir desta comparação determina-se o diagnóstico da estrutura.

Atualmente, a grande maioria dos trabalhos nesta área são de base experimental. Embora, nota-se trabalhos que desenvolvam modelos para estudo da impedância eletromecânica. Como, por exemplo, a pesquisa desenvolvida Wang *et al.* (2014), os quais realizam uma análise de impedância eletromecânica de um elemento piezoelétrico tipo barra para monitorar uma viga com um dano representado por três modelos de mola (rotacional, translacional e de cisalhamento), localizada após um primeiro PZT acoplado. Os autores empregam o método dos elementos espectrais (SEM, do inglês *Spectral Element Method*) para estudar a resposta da impedância do elemento piezoelétrico. Guo and Sun (2011) identificaram a localização e a severidade dos danos estruturais através da minimização dos desvios entre as curvas de impedância experimental e numericamente calculadas, obtidas usando o Método dos Elementos Espectrais ou SEM (do inglês, *Spectral Element Method*). Park *et al.* (2000) também utilizam o SEM e desenvolvem uma metodologia integrada para detectar e localizar danos estruturais ao combinar a técnica da impedância eletromecânica e a análise dos dados em frequência da função de resposta.

Uma das desvantagens desta técnica é o fato de ser afetada não apenas pelo estado da estrutura em análise, mas também por condições externas como ruídos, carregamentos e temperatura. Sendo assim, tem-se várias pesquisas que abordam essas influências, visando desenvolver estratégias para minimizar os seus efeitos nas curvas da impedância. Dentre estes trabalhos, tem-se Sepehry *et al.* (2010), Sun *et al.* (1995), Baptista *et al.* (2014), Park *et al.* (1999), Koo *et al.* (2009), Grisso

and Inman (2010), entre outros autores. De modo geral, estas pesquisas mostram que, devido a variações de temperatura, ocorre deslocamentos em frequência e magnitude nas curvas de IE.

Neste contexto, o presente trabalho emprega a técnica de Impedância Eletromecânica para o monitoramento da integridade estrutural de uma barra metálica considerando uma faixa de temperatura de trabalho entre 0°C a 70°C. Esta variação de temperatura altera algumas propriedades do transdutor e o módulo de elasticidade da estrutura, desta forma, analisa-se os efeitos da variação destas propriedade separadamente, assim como o resultado da combinação dos mesmos.

### 1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das curvas de Impedância Eletromecânica de uma barra devido às influências geradas pela variação da temperatura de trabalho.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Impedância Eletromecânica

A técnica da Impedância Eletromecânica consiste na utilização de um ou mais transdutores piezoelétricos como sensor(es) e atuador(es). Estes são responsáveis por realizar o acoplamento entre impedância mecânica e elétrica, a partir do qual realiza-se o monitoramento estrutural do objeto em estudo. A Impedância Eletromecânica (EMI) é obtida como a razão entre a voltagem aplicada ao PZT,  $V_{in}(\omega)$ , e corrente que passa pelo mesmo,  $I_{out}(\omega)$ :

$$Z_{EM}(\omega) = \frac{V_{in}(\omega)}{I_{out}(\omega)} \quad (1)$$

Na Figura 2, tem-se a representação da interação entre o PZT e uma estrutura de um grau de liberdade, massa ( $m_{eq}$ ), mola ( $k_{eq}$ ) e amortecimento ( $c_{eq}$ ). Este transdutor é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta a aplicação de uma voltagem alternada,  $V_{in}(\omega)$ . Uma extremidade é fixa e a outra é conectada na estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade. Dependendo do refinamento necessário, esta estrutura pode tornar-se mais complexa e completa. Um circuito elétrico auxiliar (C. A.) é utilizado para realizar a medição da corrente elétrica,  $I_{out}(\omega)$ .

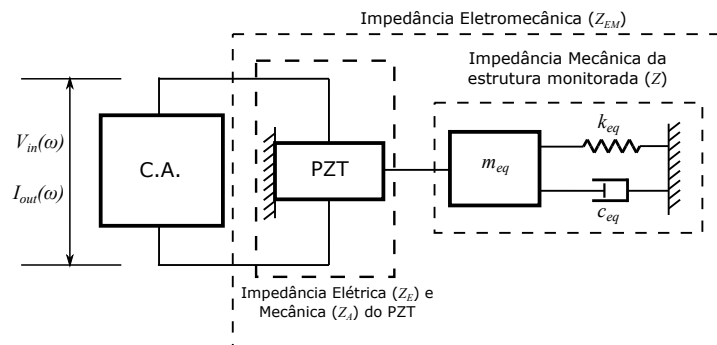


Figura 2. Representação da Impedância Eletromecânica de um modelo simplificado de 1 gdl acoplado a um PZT de barra

De acordo com a equação apresentada por Liang *et al.* (1996) em termos da admitância ( $Y_{EM}$ ), representado na Eq. (2), é possível obter a Impedância Eletromecânica do modelo da Fig. 2, visto que esta é o inverso da admitância e vice-versa.

$$Y_{EM}(\omega) = j\omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left[ \bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z(\omega)}{Z_A(\omega) + Z(\omega)} d_{31} \bar{Y}_{11}^E \right] \quad (2)$$

onde  $Y_{EM}(\omega)$  é a admitância (inverso da impedância eletromecânica), o comprimento, a largura e a espessura do PZT são  $l_A$ ,  $w_A$  e  $h_A$ , respectivamente,  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  é a constante dielétrica do PZT na direção 3-3 ( $z$ ) sob uma tensão constante,  $d_{31}$  é a constante piezoelétrica,  $\bar{Y}_{11}^E$  é o módulo de elasticidade complexo do PZT na direção 1-1 ( $x$ ) sob um campo elétrico constante,  $j = \sqrt{-1}$  representa o número imaginário puro,  $Z(\omega)$  e  $Z_A(\omega)$  são, respectivamente, a impedância mecânica da estrutura e do PZT.

## 2.2 Impedância mecânica da estrutura

A impedância mecânica representa a resposta de uma estrutura a aplicação de uma força harmônica no domínio da frequência, sendo calculada como a divisão da força  $F_{in}(\omega)$  pela  $V_{out}(\omega)$ . Em síntese, esta propriedade mede quanto uma estrutura resiste ao movimento quando submetida a uma determinada força. A impedância mecânica da estrutura ( $Z$ ) está diretamente relacionada com as suas propriedades físico-geométricas. Conseqüentemente, a presença de algum dano é responsável por alterar o comportamento da mesma. Neste trabalho, esta propriedade será calculada empregando o Método dos Elementos Espectrais, cuja formulação é apresentada mais detalhadamente por Lee (2009).

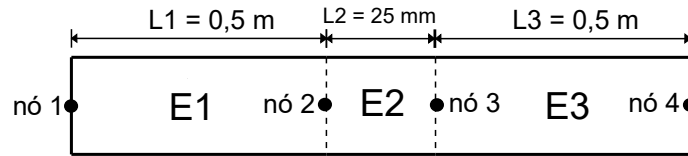


Figura 3. Esboço do problema em estudo

Selecionou-se uma barra (finita) composta por uma liga de alumínio 2024, a qual foi subdividida em três elementos (E1, E2 e E3), cujas propriedades são:  $E = 73$  GPa,  $\rho = 2,78$  g/cm<sup>3</sup>, largura invariável de 0,02 m, espessura de 2 mm e comprimento total de 1,025 m. Em todas as simulações computacionais analisando o efeito da temperatura, essas propriedades, assim como os comprimentos dos elementos apresentados na Fig. 3, mantiveram-se constantes para que não influenciem os resultados. A partir da discretização da estrutura, obteve-se informações referentes as propriedades dinâmicas da mesma no domínio na frequência. A abordagem considera dois nós por elemento, força longitudinal  $F_j$  e deslocamento  $u_j$  em cada j-ésimo nó, como exposto na Fig. 4.

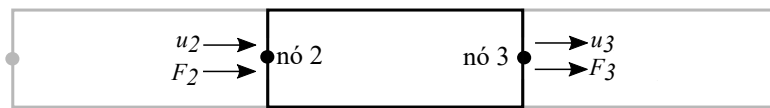


Figura 4. Esboço representando a atuação da força e o deslocamento nodal

Baseando-se na metodologia combinada apresentada por Park *et al.* (2000), obtém-se que o vetor de força nodal, considerando apenas um elemento espectral, é obtido como:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (3)$$

em que,

$$\mathbf{K} = \frac{EAik}{1 - e^{-i2kL}} \begin{bmatrix} 1 + e^{-i2kL} & -2e^{-ikL} \\ -2e^{-ikL} & 1 + e^{-i2kL} \end{bmatrix} \quad (4)$$

sendo  $\mathbf{K}$  a matriz de rigidez dinâmica local,  $u$  o deslocamento nodal,  $A$  a área da seção transversal e  $L$  o comprimento do elemento de barra. A partir da matriz de rigidez dinâmica local de cada elemento é possível obter a matriz de rigidez dinâmica global  $\mathbf{K}_g$ . Por meio desta, calcula-se a matriz de impedância mecânica  $\mathbf{Z} = \mathbf{K}_g/i\omega$ , em que  $\omega$  é a frequência angular.

Neste trabalho, será apresentado um estudo complementar sobre a influência de um dano simétrico característico de corrosão nas curvas de impedância eletromecânica. Este terá um percentual de dano igual a 30% e estará localizado no elemento 2 (E2) da barra metálica. Com isso, será possível comparar os efeitos nas curvas de impedância eletromecânica devido a um dano e às variações da temperatura.

Calculou-se a impedância pontual (velocidade e força no mesmo ponto) no nó 2. Em todas as análises, as perdas mecânicas e elétricas do transdutor e da estrutura foram desprezadas.

## 2.3 Efeito da temperatura

A temperatura é um fator determinante para as propriedades dos materiais, podendo alterar significativamente os seus valores. No caso da técnica da impedância eletromecânica, a temperatura altera as propriedades do piezoeletrico e da estrutura, podendo ocasionar em diagnósticos incorretos durante o monitoramento da integridade estrutural. Em vista disso e, considerando os diversos ambientes e condições em que as estruturas operam, analisou-se o comportamento das curvas de impedância eletromecânica para uma faixa de temperatura de 0°C a 70°C, a qual seria capaz de abranger

uma grande parcela das estruturas em atividade. Selecionou-se o piezoelétrico PSI-5H4E da Piezo Systems (2011), cuja geometria era equivalente aquela apresentada pela barra, ou seja, largura de 0,02 m, espessura de 2 mm e um comprimento de 25 mm (correspondente ao E2). Para este PZT o módulo de elasticidade  $Y_{11}^E$  é igual a 62 GPa e a densidade  $\rho$  equivale a  $7800 \text{ kg/m}^3$ .

Mediante ao *datasheet* do fabricante das cerâmicas piezoelétricas, determinou-se as propriedades do PZT na temperatura de referência ( $25^\circ\text{C}$ ) e também nas temperaturas selecionadas, que correspondem a:  $0^\circ\text{C}$ ,  $17,5^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $52,5^\circ\text{C}$  e  $70^\circ\text{C}$ . As propriedades que variavam com a temperatura são: a constante dielétrica  $\bar{\epsilon}_{33}^T$ , a constante piezoelétrica  $d_{31}$  e o fator de perda mecânica  $\eta$ , o qual está relacionado ao inverso do fator de qualidade mecânica  $Q_m$ . Estes dados estão expostos na Tab. 1 para cada temperatura analisada.

Tabela 1. Propriedades do piezoelétrico em função da temperatura

Propriedades	Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]					
	0	17,5	25 (ref.)	35	52,5	70
$d_{31}$ [ $10^{-12}$ m/V]	-293,6	-307,2	-320	-329,6	-353,6	-364,8
$\bar{\epsilon}_{33}^T$ [ $10^{-12}$ F/m]	26904	30267	33630	35311,5	40356	47082
$\eta$	0,01578	0,01562	0,01562	0,01562	0,01578	0,01645

O módulo de elasticidade da barra (Al 2024) também é afetada pela variação de temperatura. Para analisar a influência desta propriedade nesse material, baseou-se no estudo realizado por Brammer and Percival (1970), em que os autores estudam a variação das constantes elásticas de acordo com a temperatura para uma faixa de  $22^\circ\text{C}$  a  $500^\circ\text{C}$ . O valores do módulo de Elasticidade E da estrutura para a faixa de  $0^\circ\text{C}$  a  $70^\circ\text{C}$  estão apresentados na Tab. 2, sendo que a temperatura de referência corresponde a  $25^\circ\text{C}$ .

Tabela 2. Módulo de Young da estrutura em função da temperatura

Propriedades	Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]					
	0	17,5	25 (ref.)	35	52,5	70
E [GPa]	73,8	73,2	73	72,5	71,9	71,3

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente considerou-se apenas as alterações nas propriedades do piezoelétrico, Seção 3.2, depois as variações nas características da estrutura, Seção 3.3, e, por fim, as alterações nas propriedades de ambos os componentes do sistema (PZT e estrutura), correspondendo a Seção 3.4. Além disso, realizou-se um estudo incremental sobre a influência de um dano característico de corrosão simétrica localizado no elemento 2 (E2), presente na Seção 3.1, com o objetivo de comparar o efeito nas curvas de impedância eletromecânica em função de um dano e das variações de temperatura. A seguir, são apresentados os resultados obtidos mediante o algoritmo implementado no software livre Octave <sup>®</sup>.

#### 3.1 Estudo da influência de um dano simétrico

Com o objetivo de comparar e diferenciar os efeitos nas curvas de impedância eletromecânica devido a um dano ou às alterações na temperatura, obteve-se a curva da magnitude e fase da impedância eletromecânica, apresentada na Fig. 5, ao considerar um percentual de 30% de um dano simétrico característico de corrosão no elemento 2 (E2) da barra em estudo, exibida na Fig. 3. Para tal, as propriedades do piezoelétrico PSI-5H4E e da estrutura mantiveram-se constantes, a fim de que não influenciassem o resultado.

Observa-se que o dano afeta principalmente os valores das frequências de ressonância e antirressonância, sendo que, a medida que este aumenta, obtém-se menores frequências naturais. Além disso, na faixa de frequência correspondente a aproximadamente 20 kHz a 40 kHz, as divergências entre as curvas tornam-se mais intensas e de melhor visualização.

Na Figura 6 tem-se uma aproximação no quinto pico e vale da magnitude da impedância eletromecânica. Nota-se que a magnitude (ordenada) sofre alterações menos expressivas que a frequência (abscissa).

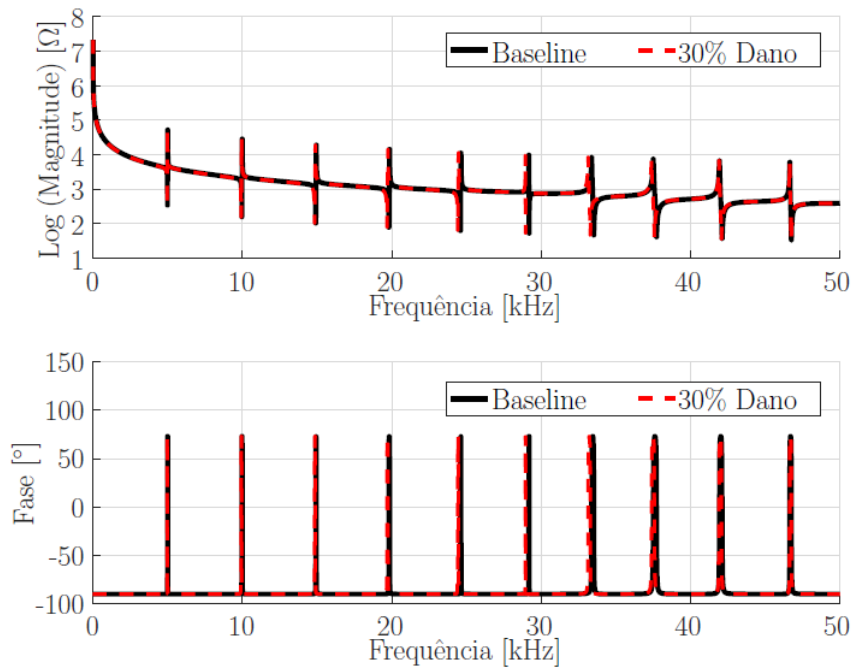


Figura 5. Magnitude e fase da Impedância Eletromecânica para um percentual de dano de 30%

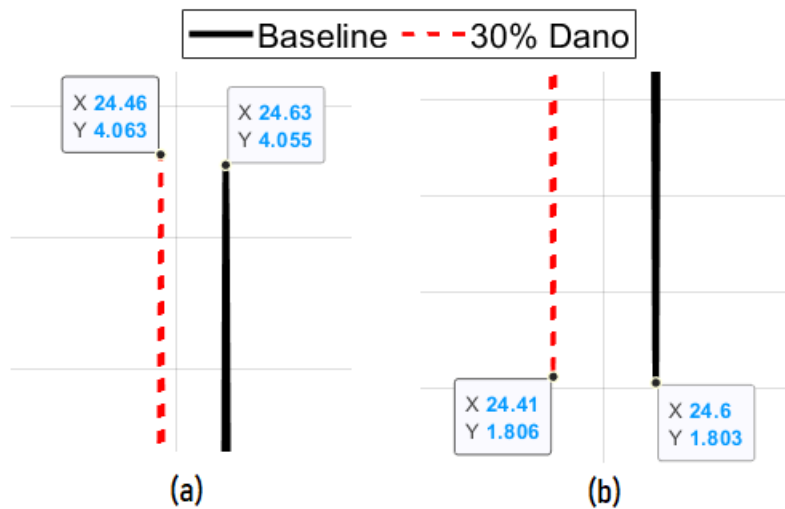


Figura 6. Aproximação no quinto pico e vale da magnitude da Impedância Eletromecânica apresentada na Figura 5: (a) pico e (b) vale

### 3.2 Alterações nas propriedades do piezoelétrico em função da temperatura

Com o propósito de avaliar como as propriedades piezoelétricas (constante dielétrica  $\bar{\epsilon}_{33}^T$ , constante piezoelétrica  $d_{31}$  e fator de perda mecânica  $\eta$ ) podem influenciar as curvas de Impedância Eletromecânica, se utilizou os dados da Tab. 1 para obtenção da curva apresentada na Fig. 7.

Observa-se que a fase se mostrou menos sensível que a magnitude na presença de variações das propriedades dos piezoelétrico. Além disso, os picos e vales de todas as curvas ficaram praticamente sobrepostos, sendo que o comportamento de dessas extremidades é exibido com maior detalhamento na Fig. 8, onde se utilizou como exemplo o quinto pico das curvas apresentadas na Fig. 7. Nota-se que esses pontos variam tanto na abscissa (frequência) quanto na ordenada (magnitude), no entanto, a variação na ordenada é predominante.

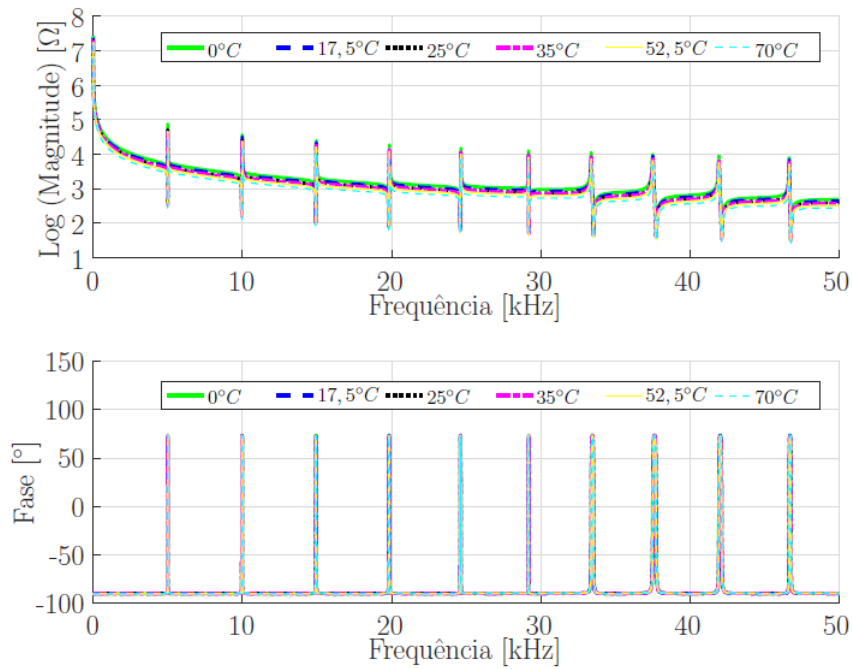


Figura 7. Magnitude e fase da Impedância Eletromecânica considerando variação da temperatura para as propriedades piezelétricas ( $\epsilon_{33}^T$ ,  $d_{31}$ ,  $\eta$ )

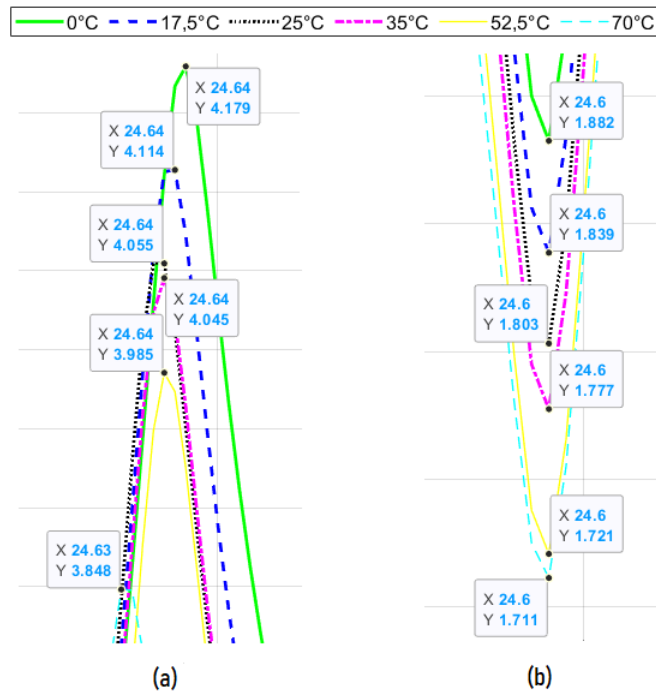


Figura 8. Aproximação no quinto pico e vale da magnitude da Impedância Eletromecânica apresentada na Figura 7: (a) pico e (b) vale

### 3.3 Alterações nas propriedades da estrutura em função da temperatura

A partir dos dados da Tab. 2, plotou-se o gráfico da Fig. 9. Percebe-se que a temperatura afeta principalmente as frequências de ressonância e antirressonância. Nota-se que com o aumento da temperatura, obtém-se menores valores das ressonâncias e anti-ressonâncias. Consequentemente, também observa-se divergências na fase da impedância, visto que as frequências de ressonâncias (vales) e antirressonâncias (picos) correspondem aos locais em que a fase altera-se. Essas variações tornam-se mais representativas quanto maior é a frequência analisada.

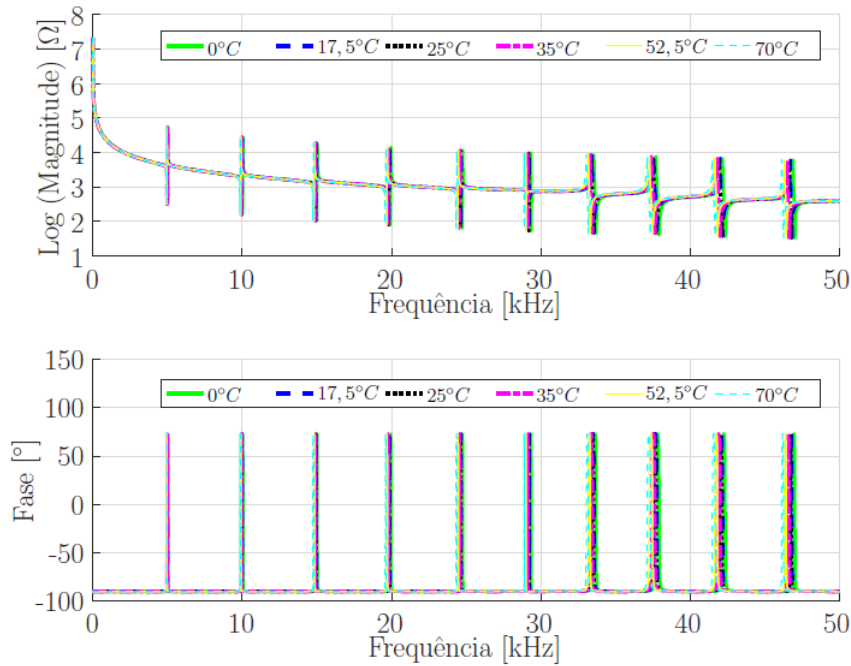


Figura 9. Magnitude e fase da Impedância Eletromecânica considerando variações na propriedade elástica ( $E$ ) da estrutura devido alterações da temperatura

Na Figura 10 tem-se uma aproximação no quinto pico e vale da magnitude da impedância eletromecânica. Nota-se que a magnitude (ordenada), em todos dos casos, altera-se menos que a frequência (abscissa), que sofre variações mais expressivas.

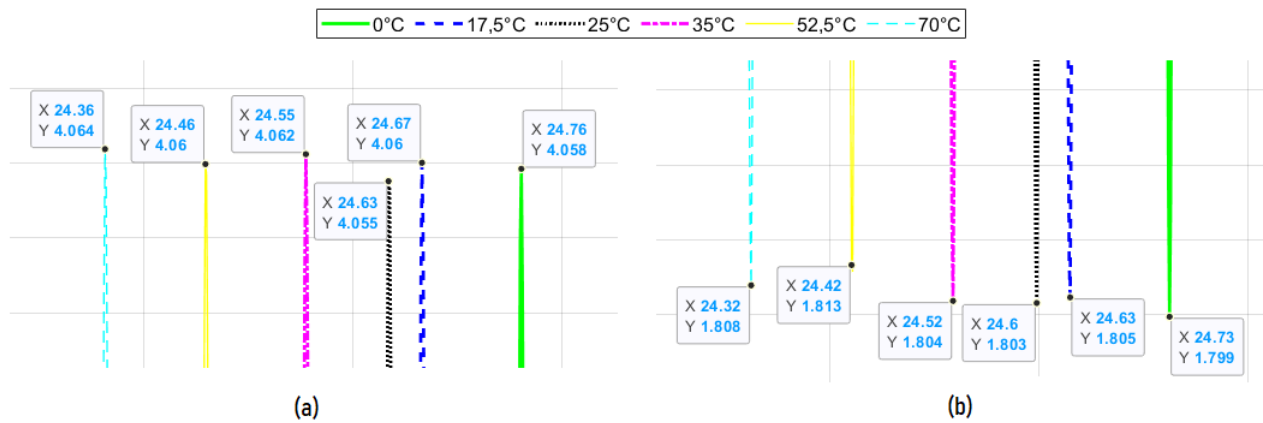


Figura 10. Aproximação no quinto pico e vale da magnitude da Impedância Eletromecânica apresentada na Figura 9: (a) pico e (b) vale

### 3.4 Alterações nas propriedades do sistema em função da temperatura

Por fim, combinou-se os dados obtidos para avaliar o efeito da temperatura no piezoeletrico e na estrutura a fim de investigar o comportamento das alterações das propriedades de forma simultânea, mostrado na Fig. 11. Observa-se que com o aumento da temperatura, menores são as amplitudes e as frequências naturais do sistema, i.e., tem-se a combinação do comportamento observado em cada um dos casos anteriores, em que o um deslocamento vertical é característico do PZT, e o horizontal está relacionado principalmente com a estrutura.



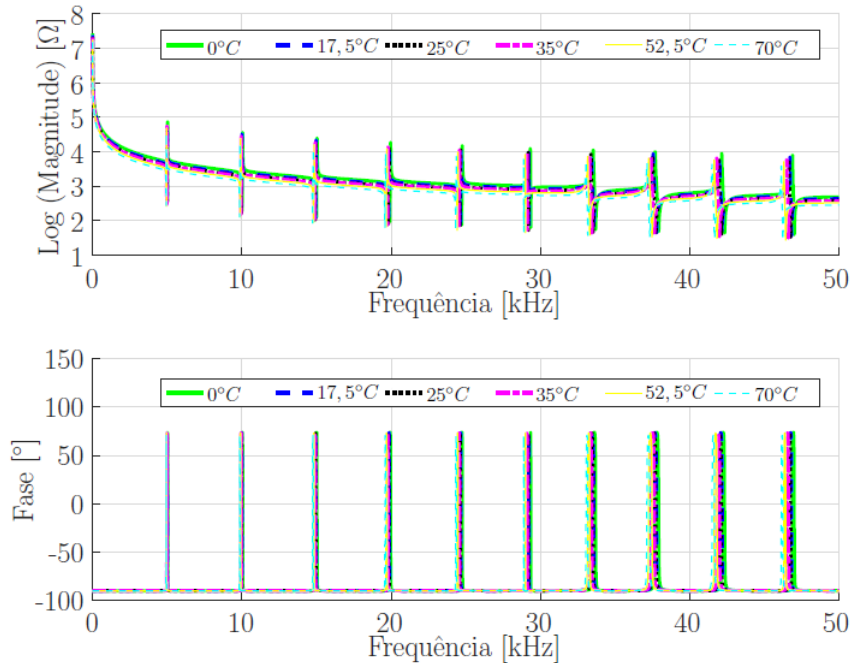


Figura 11. Magnitude e fase da Impedância Eletromecânica considerando variações nas propriedades piezolétricas ( $\epsilon_{33}^T$ ,  $d_{31}$ ,  $\eta$ ) e na propriedade elástica ( $E$ ) da estrutura devido alterações da temperatura

Na Figura 12 tem-se uma aproximação do quinto pico e vale da curva de magnitude da impedância eletromecânica. Nota-se que tanto a magnitude, quanto a frequência variaram significativamente.

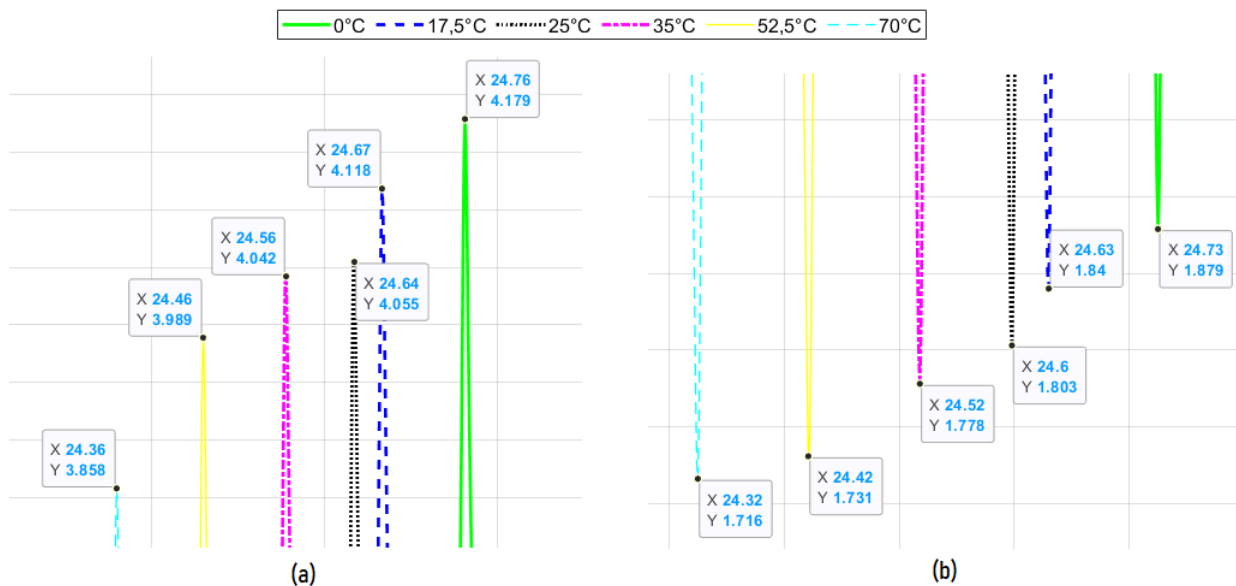


Figura 12. Aproximação no quinto pico e vale da Impedância Eletromecânica apresentada na Figura 11: (a) pico e (b) vale

Ao comparar esses resultados com aqueles apresentados na Seção 3.1 percebe-se que a temperatura será responsável por deslocamentos expressivos tanto da horizontal (frequência) quanto na vertical (magnitude) das curvas de impedância eletromecânica, enquanto que o dano apenas as desloca em uma direção: horizontal.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho visou a realização de estudos sobre a técnica de impedância eletromecânica de forma a contribuir para a formação de conhecimento e ao futuro emprego desta técnica em estruturas reais, mediante a análise do comportamento das curvas de impedância eletromecânica, aplicada no monitoramento da integridade estrutural, em função da temperatura. Com a elaboração desta pesquisa, foi possível observar mais detalhadamente como a temperatura pode afetar cada componente do sistema (transdutor e estrutura), assim como, seus efeitos individuais e combinados nas curvas de Impedância;

além de comparar os efeitos devido a um dano ou à variações de temperatura.

No caso do PZT, observou-se principalmente um deslocamento vertical nas curvas de magnitude, em que obteve-se menores valores de amplitudes com o aumento da temperatura. Na estrutura, entretanto, o deslocamento foi horizontal, caracterizado por diminuição nos valores das frequências naturais a medida que a temperatura aumenta. Por fim, obteve-se a combinação desses dois efeitos ao estudar todo o sistema. Ao comparar esses resultados com aqueles obtidos ao considerar um dano simétrico na estrutura cujo percentual equivale a 30%, concluiu-se que o efeito deste é principalmente na frequência (abscissa), enquanto que a temperatura irá provocar o deslocamento das curvas de impedância eletromecânica em ambas as direções, como dito anteriormente.

Conclui-se que as observações deste trabalho estão condizentes com aquelas da literatura, visto que as mesmas tendências para o deslocamento das curvas de impedância eletromecânica foi verificado por demais autores como Sepehry *et al.* (2010) e Park *et al.* (1999).

## 5. REFERÊNCIAS

- Baptista, F.G., Budoya, D.E., De Almeida, V.A.D. and Ulson, J.A.C., 2014. “An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedancebased structural health monitoring”. *Sensors* 14, pp. 1208–1227.
- Brammer, J.A. and Percival, C.M., 1970. “Elevated-temperature elastic moduli of 2024 aluminum obtained by a laser-pulse technique”. *Experimental Mechanics*, Vol. 10, No. 6, p. 245–250.
- Farrar, C.R., Lieven, N.A.J. and Bement, M.T., 2005. *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. Wiley, 1st edition.
- Grisso, B.L. and Inman, D.J., 2010. “Temperature corrected sensor diagnostics for impedance-based shm”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 12, p. 2323–2336.
- Guo, Z. and Sun, Z., 2011. “Spectral element modeling based structure piezoelectric impedance computation and damage identification”. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 458–464.
- Koo, K.Y., Park, S., Lee, J.J. and Yun, C.B., 2009. “Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 4, pp. 367–377.
- Lee, U., 2009. *Spectral Element Method in Structural Dynamics*. Wiley, 1st edition.
- Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., 1993. “Coupled electromechanical analysis of piezoelectric ceramic actuator-driven systems: determination of the actuator power consumption and system energy transfer”. *Smart Structures and Materials*. URL: <https://doi.org/10.1117/12.152767>.
- Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., 1996. “Electro-mechanical impedance modeling of active material systems”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 2, pp. 171–186.
- Louzada, D.R., 2019. *Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e redes neurais artificiais*. Master’s thesis, PUC - Rio.
- Park, G., Cudney, H.H. and Inman, D.J., 2000. “An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 6, pp. 448–455.
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H. and Inman, D.J., 1999. “Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications”. *JSME International Journal Series A*, Vol. 42, No. 2, pp. 249–258.
- Piezo Systems, 2011. *Material Data - Specific Parameters of the Standard Materials*. Woburn, Massachusetts, 1st edition.
- Sepehry, N., Shamshirsaz, M. and Bastani, A., 2010. “Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature”. *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 6, p. 573–585.
- Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C. and Rogers, C.A., 1995. “Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, No. 1, pp. 134–139.
- Tebaldi, A., 2014. *Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Algoritmos Genéticos*. Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Wang, D., Song, H. and Zhu, H., 2014. “Electromechanical impedance analysis on piezoelectric smart beam with a crack based on spectral element method”. *Mathematical Problems in Engineering*, p. 13.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.