

MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Kayc Lopes, lopeskayc@gmail.com¹

Mara Lúcia Martins Lopes, mara@mat.feis.unesp.br²

Camila Gianini Gonzalez Bueno, cggonsalez@gmail.com¹

Fábio Roberto Chavarette, fabioch@mat.feis.unesp.br²

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, SP, Brasil

²Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Matemática, Ilha Solteira, SP, Brasil

Resumo: Atualmente, sistemas SHM (Structural Health Monitoring) são altamente promissores para melhoramento dos planos de manutenção de sistemas mecânicos. Neste cenário, destaca-se a técnica da Impedância Eletromecânica que baseia-se no acoplamento da impedância elétrica de transdutores piezoelétricos com a impedância mecânica da estrutura monitorada. Entretanto, estes sistemas podem estar expostos a fatores críticos ambientais como a temperatura, que gera alterações nas curvas da Impedância Eletromecânica e pode resultar em falsos alarmes. Como lógica de pós-processamento dos sinais destaca-se o Algoritmo de Seleção Negativa (ASN), que faz a distinção entre sinais da estrutura em condição normal e em condição de falha utilizando um pacote de baselines. Neste trabalho utilizou-se o ASN para analisar diversos sinais obtidos de uma estrutura mecânica tipo viga em três temperaturas diferentes (24°C, 70°C e 100°C) com duas condições: estrutura sem falha e com falha (dois tipos de danos). Obteve-se uma alta eficiência do Algoritmo utilizado, apresentando 100% de acerto na análise da parte real da Impedância Eletromecânica mesmo com a presença de sinais obtidos em temperaturas onde o piezoelétrico apresentou comportamento aparentemente não linear. Dessa forma, conclui-se que a técnica apresentada tem potencial para ser utilizada em sistemas SHM submetidos a variação de temperatura.

Palavras-chave: Monitoramento da Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Temperatura, Algoritmo de Seleção Negativa

1. INTRODUÇÃO

O Monitoramento da Integridade Estrutural (do inglês, *Structural Health Monitoring* – SHM) surgiu com o objetivo de detectar falhas em estados iniciais para que acidentes possam ser evitados. Nas últimas décadas, pesquisas relacionadas ao monitoramento da integridade estrutural receberam bastante atenção, isso devido a importância dessa área quando se trata de segurança e economia.

Segundo Doebling *et al.* (1998), um sistema SHM pode ser classificado em 4 níveis:

1. detecção do dano;
2. detecção e localização do dano;
3. detecção, localização e avaliação do dano;
4. detecção, localização, avaliação do dano e predição da vida útil da estrutura.

Neste cenário destaca-se a técnica da Impedância Eletromecânica (E/M), inicialmente proposta por Liang *et al.* (1997) e posteriormente abordada por muitos autores, como Baptista and Filho (2009), Baptista (2010), Júnior *et al.* (2000), Júnior and Júnior (2006), entre outros. A técnica baseia-se no acoplamento da impedância mecânica da estrutura com a impedância elétrica de transdutores piezoelétricos que são acoplados na estrutura a ser monitorada. Dessa forma, é possível analisar a integridade de estruturas através das curvas de impedância elétrica. Conforme apresentado por Park *et al.* (1999), esta técnica apresenta algumas vantagens, como o fator de poder ser aplicada em estruturas complexas (não precisando de modelagem matemática) e, trabalhar em altas frequências (elevada sensibilidade para detecção de danos pequenos).

Entretanto, em sistemas SHM alguns fatores externos como temperatura e pressão podem gerar variações nas curvas monitoradas e, caso estes efeitos não forem devidamente considerados pode haver confusão no processo de diagnóstico dos sistemas e até mesmo a ocorrência de falsos alarmes. Estudos feitos por Park *et al.* (1999), Baptista *et al.* (2014) e

Lopes *et al.* (2017) apresentam efeitos da variação da temperatura nas curvas da Impedância Eletromecânica. Segundo os trabalhos citados, pode-se observar três efeitos principais nas curvas, que são: deslocamento em frequência e; deslocamento vertical dos sinais e; suavização dos picos e vales. Esses efeitos podem ser observados na Fig. 1, que apresenta as partes real e imaginária da E/M para as temperaturas de 25°C, 65°C e 95°C, na faixa de frequência de 6 a 20 kHz. (Lopes *et al.* (2017))

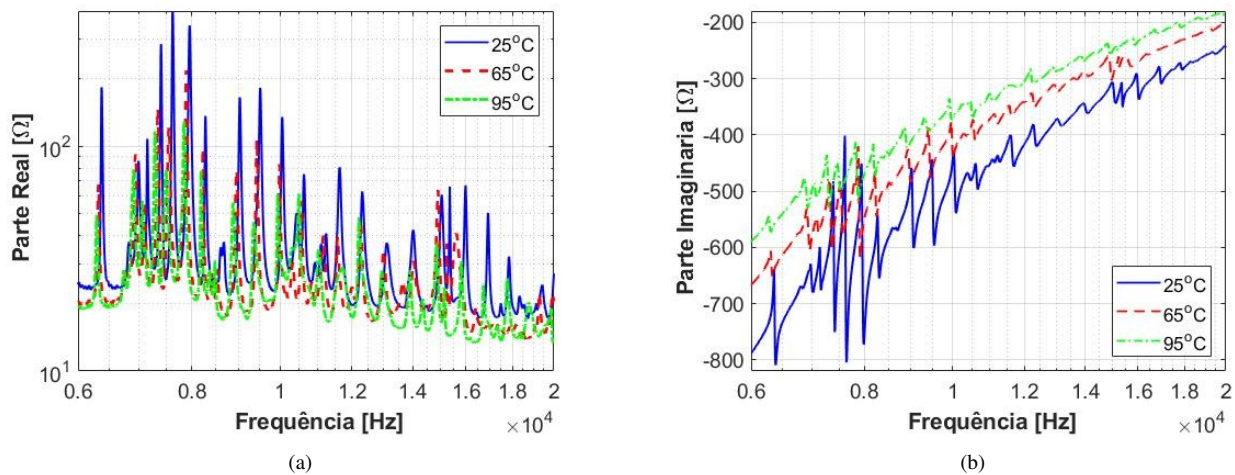


Figura 1: Efeito da temperatura nas curvas da Impedância E/M. (a) Parte Real e; (b) Parte Imaginária. (Lopes *et al.* (2017))

Existem diversas técnicas de pós processamento utilizadas para sistemas SHM, uma delas é o Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) que consiste em uma das técnicas de Sistemas Imunológicos Artificiais e se inspira na seleção negativa dos linfócitos T que ocorre no timo do organismo, responsável pela distinção entre células próprias e não-próprias. Neste método existem duas etapas, *sensoriamento* e *monitoramento*, cujos fluxogramas podem ser observados nas Fig. 2 e 3.

Na primeira fase, Fig. 2, determina-se o conjunto de detectores próprios que corresponde ao pacote de *baselines* do sistema.

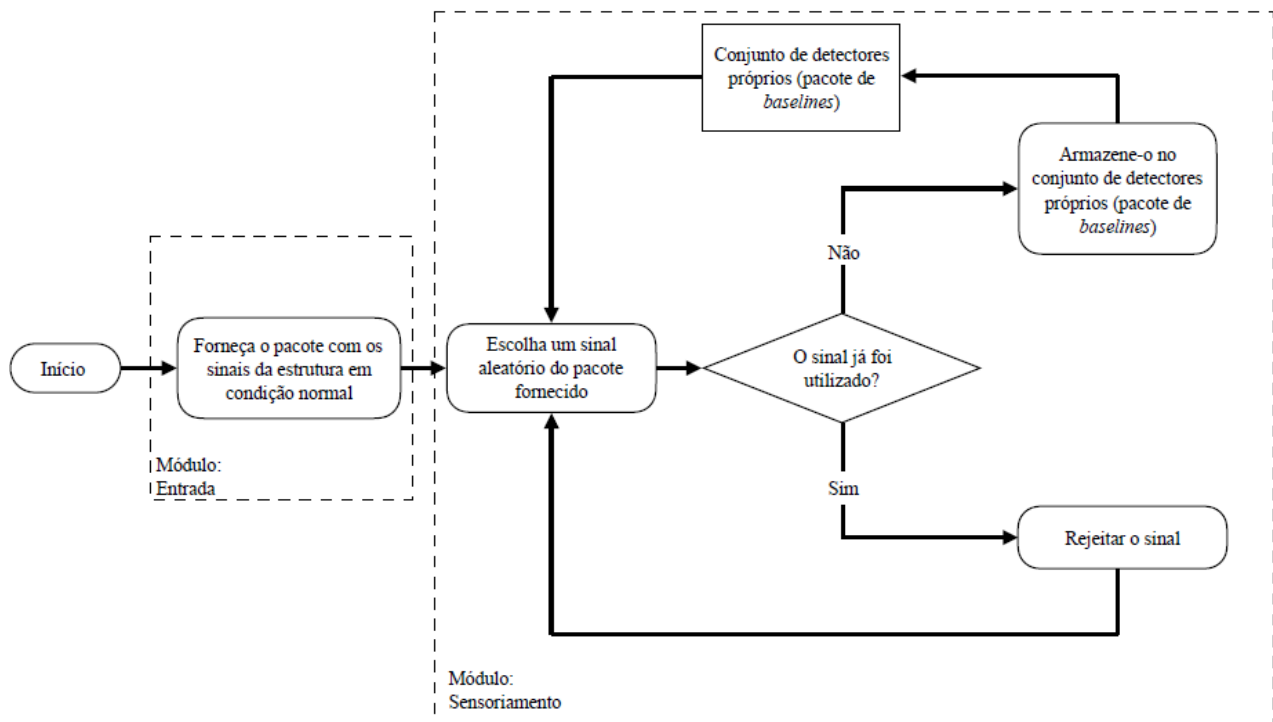


Figura 2: Fluxograma da fase de sensoriamento do Algoritmo de Seleção Negativa (ASN). (Adaptado de dos Anjos Lima (2014))

Concluída a primeira fase é possível efetuar o monitoramento, Fig. 3, quando é feita a análise dos sinais na condição desconhecida. Nesta análise os sinais são comparados com o pacote de *baselines*.

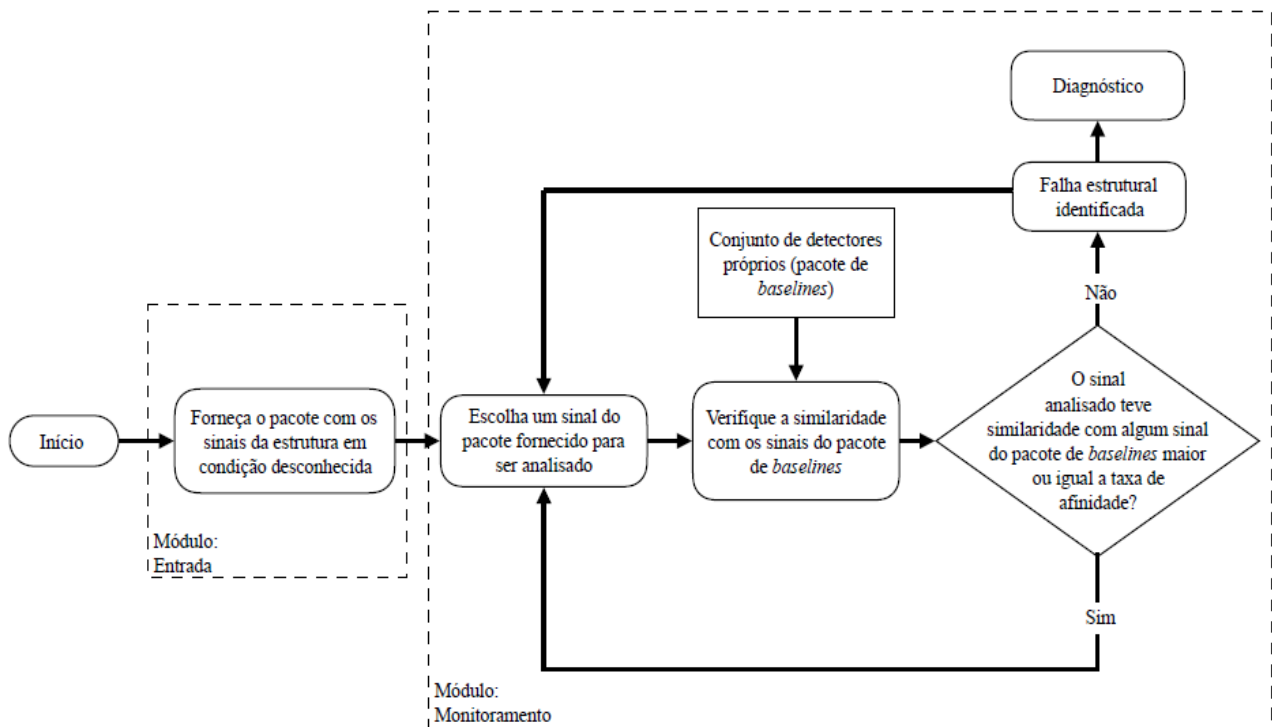


Figura 3: Fluxograma da fase de monitoramento do Algoritmo de Seleção Negativa (ASN). (Adaptado de dos Anjos Lima (2014))

Este trabalho tem como objetivo testar o ASN em um sistema SHM considerando variações da temperatura ambiente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A estrutura ensaiada foi uma viga de alumínio na condição livre-livre, ou seja, a viga permaneceu suspensa por dois elásticos. Um elemento piezoelétrico (PZT) do tipo *Buzzer* foi acoplado a superfície da viga. As características geométricas da viga e do PZT estão expostas na Tab. 1. (Gonsalez (2012))

Tabela 1: Características geométricas da viga e do PZT.

Propriedades (mm)	Viga	PZT
Comprimento	500	-
Largura	40	-
Espessura	2	0.2
Diâmetro Externo	-	35
Diâmetro Interno	-	25

A aquisição e pré-processamento dos dados foram controlados pelo software *LabView®* em conjunto com uma placa da *National Instruments*, modelo NI-USB 6211, 16 bits. A Figura 4 apresenta um esboço da montagem experimental utilizada. Mais detalhes sobre o analisador de impedância utilizado podem ser encontrados em Baptista (2010).

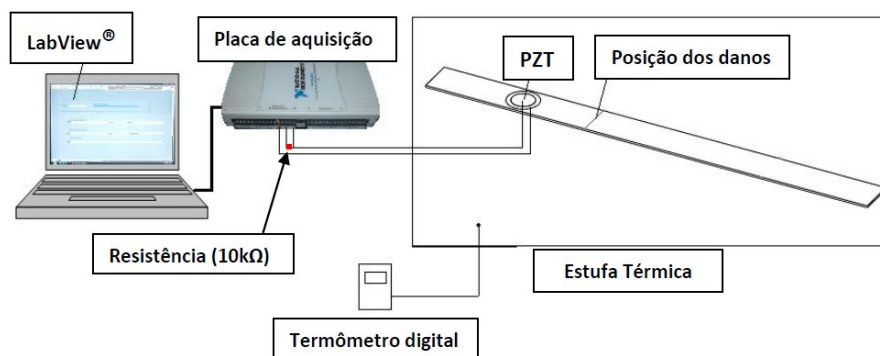


Figura 4: Esquema da montagem experimental utilizada. (Gonsalez (2012))

Os sinais foram coletados em três diferentes temperaturas: 24°C, 70°C e 100°C. Para realizar a excitação, utilizou-se uma varredura senoidal em frequência, uma amplitude de mais ou menos 0.5 V, faixa de frequência de 0 a 125 kHz. Para cada temperatura foram coletados sinais da estrutura em condição normal (saudável), e sinais da estrutura em condições de falhas. Duas condições de falhas foram abordadas (um corte e acréscimo de massa), ambas foram posicionadas a 150 mm do centro do PZT. A Figura 5 apresenta mais detalhes dos danos simulados.

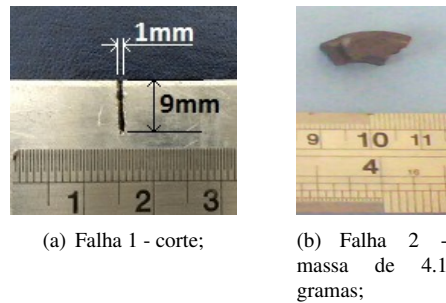


Figura 5: Falhas simuladas utilizadas.

A Tabela 2 apresenta uma breve descrição de todos os sinais aqisitados, como pode ser observado, 32 sinais foram aqisitados e fornecidos ao ASN.

Tabela 2: Sinais aqisitados.

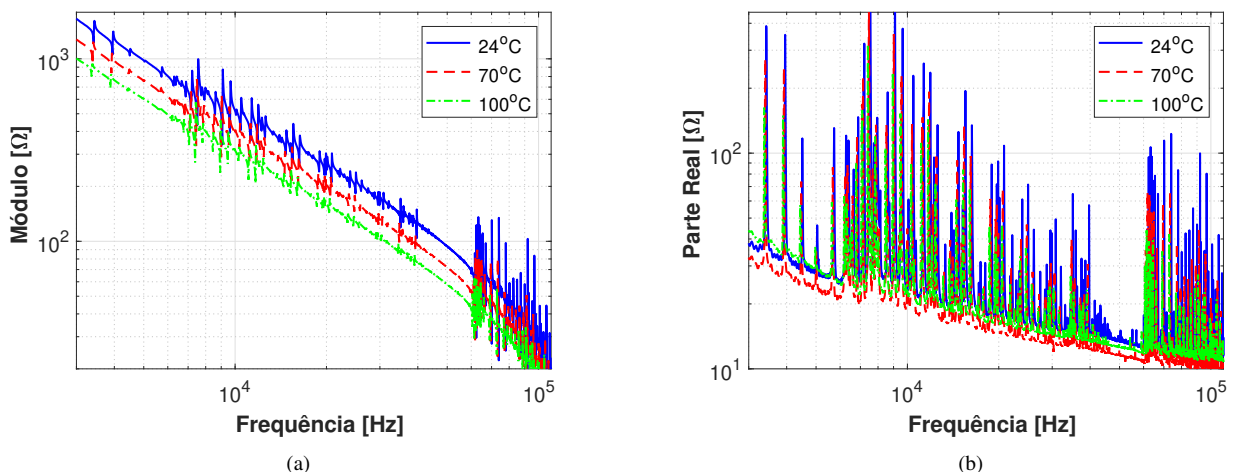
Sinais	Condição Estrutural	Fase do ASN	Temperatura (°C)
1 - 5	Baseline	Sensoriamento	24
6 - 10	Baseline		70
11 - 15	Baseline		100
16 e 17	Falha 1	Monitoramento	24
18 e 19	Falha 2		24
20 e 21	Falha 1		70
22 e 23	Falha 2		70
24 e 25	Falha 1		100
26 e 27	Falha 2		100
28 - 32	Sem falha		24

Para cada sinal analisado pela fase de monitoramento do ASN é encontrada uma porcentagem de afinidade. Que em suma, representa quão parecido o sinal analisado é de algum sinal do pacote de *baselines*. Desta forma, a taxa de afinidade pode ser relacionada ao *threshold* de um sistema SHM e, neste trabalho, foi adotado como 80%.

Para entender melhor a sensibilidade de cada parte do sinal da Impedância Eletromecânica foram analisados módulo, parte real, parte imaginária e fase dos sinais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta o módulo, parte real, parte imaginária e fase de algumas das curvas da E/M utilizadas para o pacote de *baselines*.



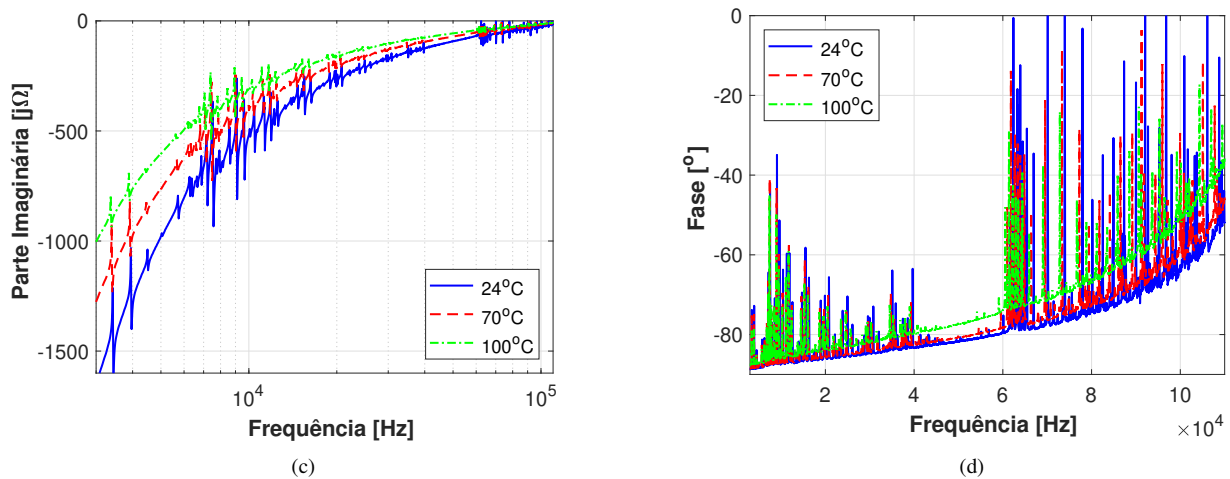


Figura 6: Curvas obtidas da Impedância E/M para três temperaturas (24°C, 70°C, 100°C) na faixa de frequência de 3 a 110 kHz. (a) Módulo; (b) Parte Real; (c) Parte Imaginária e; (d) Fase.

Conforme esperado, observa-se três variações nos sinais devido ao aumento da temperatura, que são: deslocamento em frequência, deslocamento em amplitude e redução dos picos e vales. Entretanto, para o sinal a 100°C observa-se uma variação não linear das curvas da parte real (Fig. 6(b)). Com o aumento da temperatura, esperava-se que a curva mantivesse a tendência de deslocamento vertical para baixo. No entanto, a curva se deslocou para cima.

A Figura 7 apresenta módulo, parte real, parte imaginária e fase dos sinais obtidos a 24°C (condição *baseline*), com falha 1 (corte) e com falha 2 (acréscimo de massa).

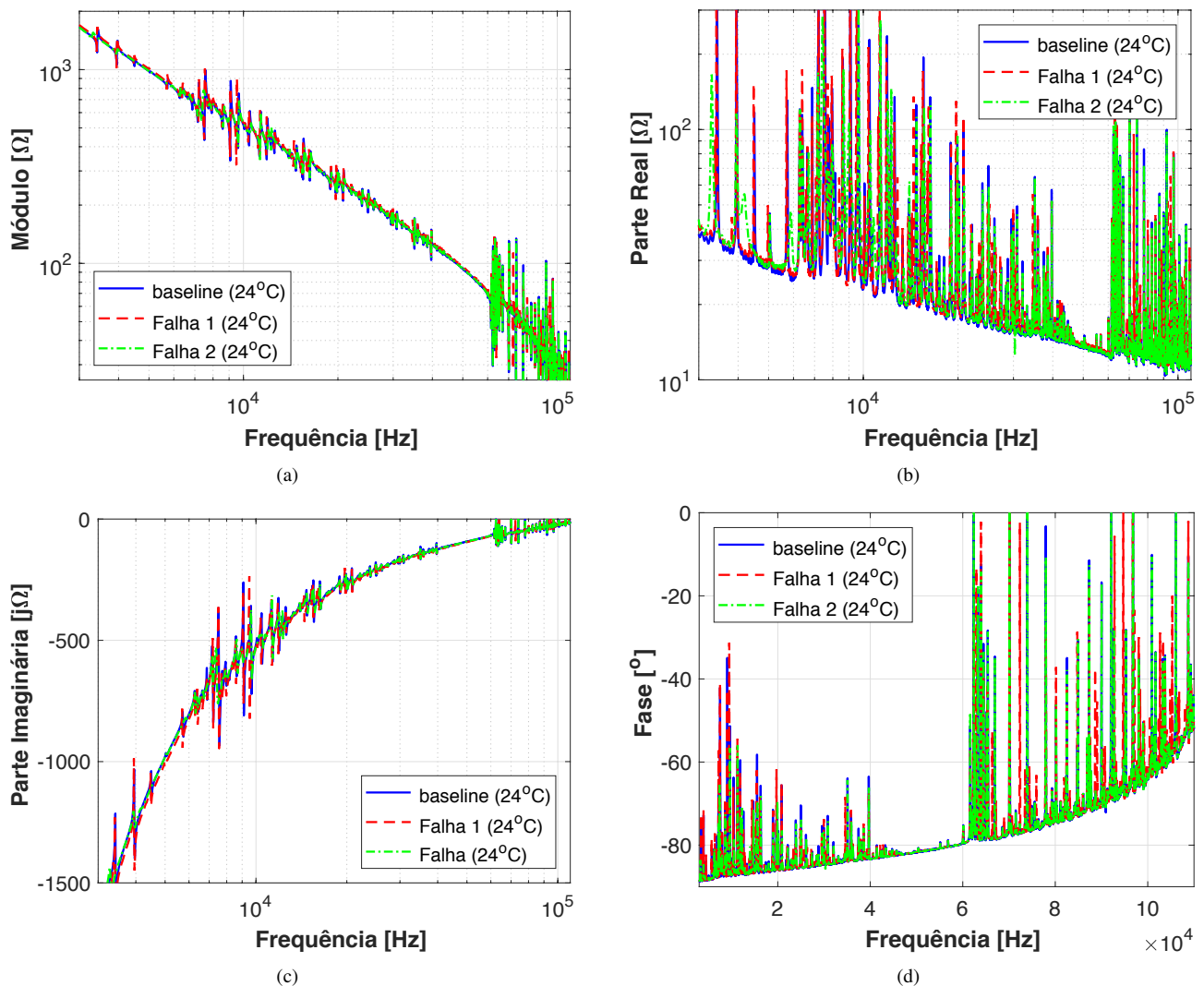


Figura 7: Curvas obtidas (*baseline*, falha 1 e falha 2) da Impedância E/M na faixa de frequência de 3 a 110 kHz para a temperatura de 24°C. (a) Módulo; (b) Parte Real; (c) Parte Imaginária e; (d) Fase.

Dessa forma, pela análise dos gráficos apresentados na Fig. 7, pode-se observar que a presença das falhas altera todas as partes dos sinais (módulo, parte real, parte imaginária e fase).

As classificações obtidas pela fase de monitoramento do ASN estão expostas na Tab. 3. Como pode ser observado, as quatro partes dos sinais foram analisadas separadamente.

Tabela 3: Resultados obtidos pela fase de monitoramento do ASN.

Parte do Sinal	Quantidade de sinais classificados como condição normal	Quantidade de sinais classificados como condição de falha	Porcentagem de acerto
Módulo	7	10	88,24
Parte Real	5	12	100
Parte Imaginária	9	8	76,47
Fase	10	7	70,59

Complementar à Tab. 3, as porcentagens de afinidades obtidas para cada sinal analisado estão apresentadas na Fig. 8. Nesta figura, a linha tracejada indica o valor da taxa de afinidade considerada.

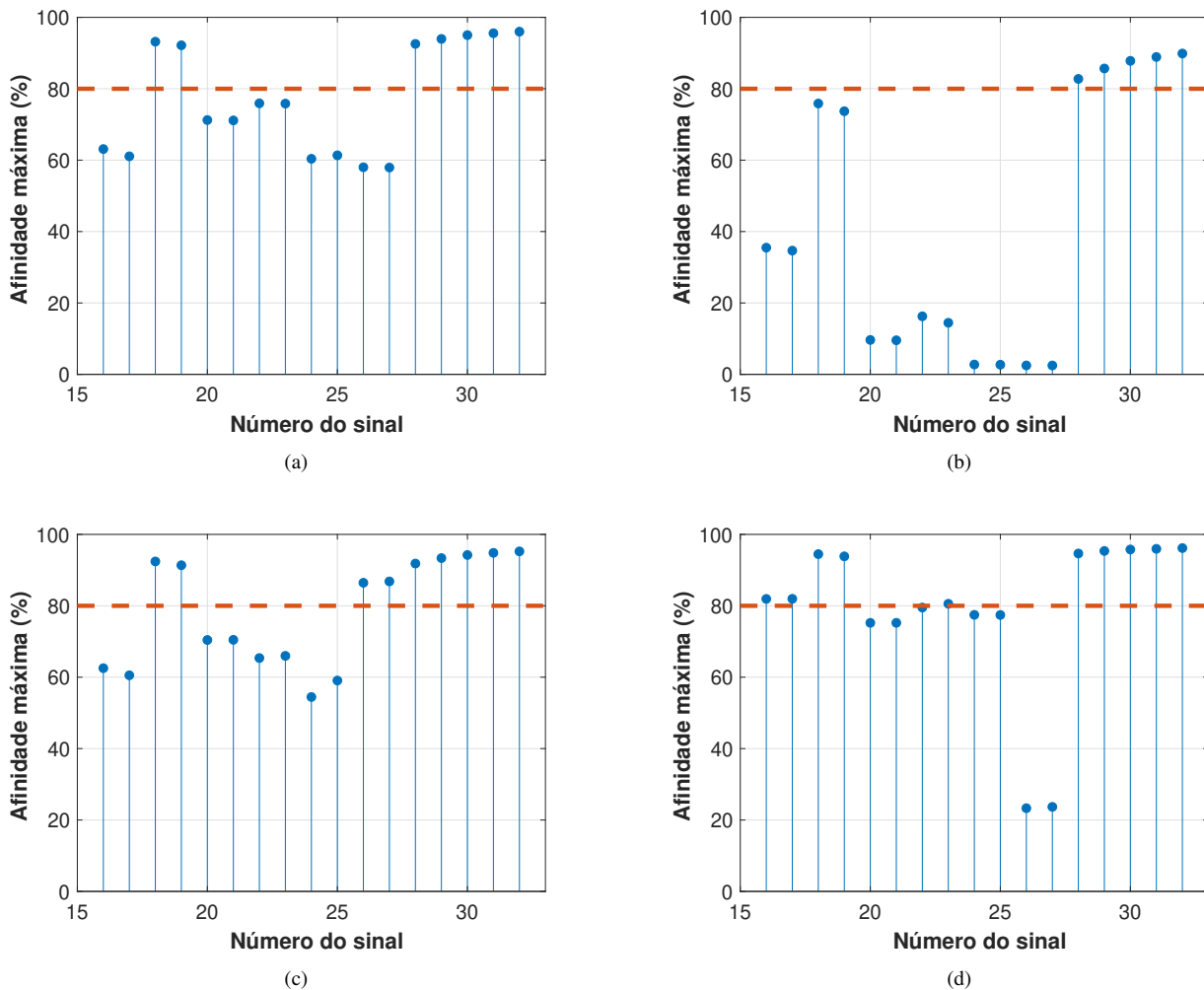


Figura 8: Gráficos de similaridades máximas obtidas dos sinais analisados quando comparados com o pacote de *baselines*. (a) Módulo; (b) Parte Real; (c) Parte Imaginária e; (d) Fase.

4. CONCLUSÕES

Após análise dos sinais, notou-se que a variação de temperatura afeta o diagnóstico de sistemas SHM baseados na técnica da Impedância Eletromecânica. Entretanto, o ASN apresentou boa eficiência para auxiliar o diagnóstico de sistemas SHM mesmo considerando variações de temperatura. Até mesmo quando o comportamento do sistema foi, aparentemente, não linear. É importante destacar que a maior eficiência do ASN foi obtida utilizando a parte real da Impedância E/M e, segundo muitos trabalhos, a parte real é mais sensível a presença de falhas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (proc. nº 2016/12241-0) pelo apoio financeiro, ao Laboratório SisPlexoS e ao Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT).

6. REFERÊNCIAS

- Baptista, F.G. and Filho, J.V., 2009. “A new impedance measurement system for pzt-based structural health monitoring”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 10, pp. 3602–3608. ISSN 0018-9456. doi: 10.1109/TIM.2009.2018693.
- Baptista, F.G., 2010. “Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica”.
- Baptista, F.G., Budoya, D.E., Almeida, V.A.D.d. and Ulson, J.A.C., 2014. “An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring”. *Sensors*, Vol. 14, No. 1, pp. 1208–1227. ISSN 1424-8220. doi:10.3390/s140101208. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/1/1208>.
- Doebeling, S.W., Farrar, C. and Prime, M., 1998. “A summary review of vibration-based damage identification methods”. Vol. 30, pp. 91–105.
- dos Anjos Lima, F.P., 2014. “Monitoramento e identificação de falhas em estruturas aeronáuticas e mecânicas utilizando técnicas de computação inteligente”.
- Gonzalez, C.G., 2012. “Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas shm utilizando a técnica da impedância eletromecânica (e/m)”.
- Júnior, J.D.R.V.D.M. and Júnior, V.S., 2006. “Impedance-based health monitoring for aeronautic structures using statistical meta-modeling”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 11, pp. 1023–1036. doi:10.1177/1045389X06063087. URL <https://doi.org/10.1177/1045389X06063087>.
- Júnior, V.L., Park, G., Cudney, H.H. and Inman, D.J., 2000. “Impedance-based structural health monitoring with artificial neural networks”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 206–214. doi: 10.1106/H0EV-7PWM-QYHW-E7VF. URL <https://doi.org/10.1106/H0EV-7PWM-QYHW-E7VF>.
- Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., 1997. “Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 4, pp. 335–343. doi:10.1177/1045389X9700800406. URL <https://doi.org/10.1177/1045389X9700800406>.
- Lima, F.P.A., Chavarette, F.R., Souza, S.S.F. and M., L.M.L., 2017. *Monitoring and Fault Identification in Aeronautical Structures Using an Wavelet-Artificial Immune System Algorithm*, Springer International Publishing, Cham, pp. 203–219. ISBN 978-3-319-55852-3.
- Lopes, K., Chavarette, F.R., Lopes, M.L.M. and Bueno, C.G.G., 2017. “Estudo da influência da temperatura em sistemas de monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica”.
- 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. doi: 10.1299/jsmea.42.249.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores declaram que são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING USING ARTIFICIAL IMMUNOLOGICAL SYSTEMS

Kayc Lopes, lopeskayc@gmail.com¹

Mara Lúcia Martins Lopes, mara@mat.feis.unesp.br²

Camila Gianini Gonsalez Bueno, cggonsalez@gmail.com¹

Fábio Roberto Chavarette, fabioch@mat.feis.unesp.br²

¹São Paulo State University (UNESP), Department of Mechanical Engineering, Ilha Solteira, SP, Brazil

²São Paulo State University (UNESP), Department of Mathematics, Ilha Solteira, SP, Brazil

Abstract: Currently, Structural Health Monitoring (SHM) systems are highly promising for mechanical systems maintenance plans improvement. In this scenario, we highlight the Electromechanical Impedance technique that is based on the coupling of the electrical impedance of piezoelectric transducers with the monitored structure mechanical impedance. These systems may be exposed to critical environmental factors such as temperature, this causes changes in the electromechanical impedance curves and may result in false alarms. As a post-processing logic of the signals the Negative Selection Algorithm (NSA) stands out, this algorithm distinguishes between signals of the structure in normal condition and in fault condition using a baseline package. In this work the NSA was used to analyze several signals obtained from a beam-type mechanical structure at three different temperatures (24°C, 70°C and 100°C) with two conditions: failed and non-failed structure (two types of damage). A high efficiency was obtained, presenting 100% of hits in the analysis of the Electromechanical Impedance real part even with the presence of signals obtained in temperatures where the piezoelectric presented apparently non-linear behavior. Thus, it is concluded that the presented technique has the potential to be used in SHM systems subjected to temperature variation.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Temperature, Negative Selection Algorithm