



## IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM UMA EMPENAGEM VERTICAL USANDO IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO COM REDES NEURAS PROBABILÍSTICAS

**Jose dos Reis Vieira de Moura Jr**

zereis@ufg.br - Instituto de Matemática e Tecnologia – Universidade Federal de Goiás  
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar 1120, St. Universitário, 75704-020, Catalão - GO

**Valder Steffen Jr**

vsteffen@mecanica.ufu.br - Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de  
Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia - MG

**Resumo.** Nos últimos anos algumas técnicas experimentais de integridade estrutural têm recebido maior atenção devido ao desenvolvimento de dispositivos e métodos. Dentre estes procedimentos destaca-se o monitoramento da integridade estrutural baseado em sinais de impedância eletromecânica. Uma desvantagem do uso desta técnica é a variabilidade dos sinais medidos devido a frequências elevadas e sensíveis, temperatura, pressão, ruídos de circuitos, etc. Assim, um estudo da confiabilidade do sistema de identificação de falhas é proposto neste trabalho para se avaliar o monitoramento de falhas de uma empenagem vertical de um Veículo Aéreo Não Tripulado. Foram utilizadas adições de massas em algumas posições enquanto dois sensores são utilizados para a aquisição dos sinais de impedância. Um modelo baseado em redes neurais probabilísticas foi criado para modelar o processo de identificação de falhas na empenagem. Após isto, uma análise da variabilidade dos sinais reais foi feita e uma simulação de Monte Carlo foi realizada para a geração de sinais virtuais de impedância que foram avaliados pela rede neural inicial para identificação das falhas. Por fim, é importante ressaltar a importância da adição do comportamento estocástico ao modelo baseado em dados experimentais de uma estrutura real para compreensão da confiabilidade do uso do modelo.

**Palavras-chave:** Monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância, Redes neurais probabilísticas, Aeronaves não tripuladas

## INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas de SHM (Structural Health Monitoring – Monitoramento da Integridade Estrutural) que visam o acompanhamento contínuo da integridade da estrutura, o modelo baseado em impedância tem encontrado aplicabilidade em diversas áreas, assim como outras técnicas, como as Ondas de Lamb e Vácuo Comparativo (Moura Jr, 2008). O método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica tem sido desenvolvido como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais em tempo real e é considerado como um novo método de avaliação não destrutiva (Park et al, 2003).

Este método tem mostrado que a impedância elétrica do material piezoelétrico PZT pode ser associada diretamente com a impedância mecânica da estrutura à qual a pastilha de PZT esteja colada. Utilizar o mesmo elemento tanto como sensor quanto como atuador não somente reduz o número de componentes, como também os fios associados a cada um deles (Park et al, 2003).

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para o monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang et al (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry et al (1995, 1996), Sun et al (1995), Park et al (1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2001, 2003), Giurgiutiu and Zagari (2000), Giurgiutiu et al (2002, 2003), Zagari and Giurgiutiu (2001), Soh et al (2000), Bhalla et al (2002a, 2002b), Naidu et al (2002), e Moura Jr e Steffen Jr (2004 e 2006).

Utilizando frequências geralmente acima de 30 KHz, o método utiliza elevadas frequências aplicadas às pastilhas de PZT coladas sobre a superfície de estruturas para a realização do monitoramento da integridade estrutural, ou seja, para avaliação das modificações dos sinais que são capturados pelo sensor. As pastilhas de PZT utilizam uma diferença de potencial muito baixa, menores que 1 V, gerando uma alta frequência de excitação em determinados pontos da estrutura (Park et al, 2003). Entretanto, de acordo com Raju (1997), o valor de 1V apresenta bons resultados para identificação de mudanças estruturais.

Na Fig. 1 é representado o modelo unidimensional eletromecânico do sistema de monitoramento de integridade estrutural utilizando os sinais de impedância (Raju, 1997).

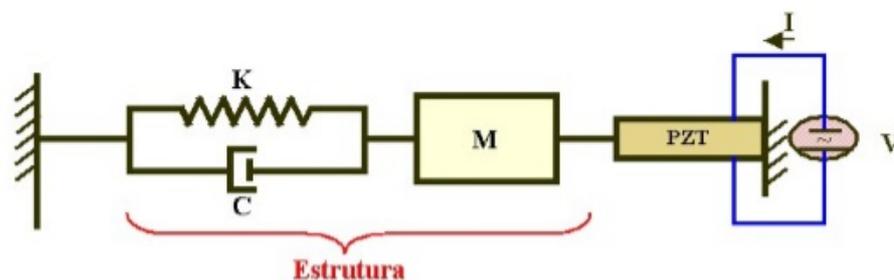


Figura 1. Modelo 1D do processo de monitoramento da impedância eletromecânica.

É considerado que um atuador PZT axial seja posicionado em uma das extremidades do sistema, enquanto a outra está fixa. Liang et al (1994) demonstrou que a admitância  $Y(\omega)$  do atuador PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT  $Z_a(\omega)$  e da estrutura  $Z(\omega)$ , assim como mostra a Eq. (1).

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega a \left( \frac{-T}{\bar{\epsilon}_{33}^T} - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (1)$$

onde  $V$  é a voltagem de entrada no atuador PZT,  $I$  é a corrente de saída do PZT,  $a$  é a constante geométrica,  $d_{3x}$  é a constante de acoplamento piezoelétrico,  $Y_{xx}^E$  é o módulo de Young e  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  é a constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero.

Supondo que as propriedades mecânicas do PZT não variem ao longo do tempo utilizado para monitoramento, a Eq. (1) mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura, levando a utilização dos sinais de impedância elétrica do PZT para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

A técnica basicamente consiste na obtenção de funções de resposta em frequência (FRFs) da estrutura e posterior avaliação da modificação destes sinais, periodicamente. Uma modificação destas FRFs indicaria uma modificação estrutural e, portanto, uma falha (Raju, 1997).

Os gráficos das respostas da impedância fornecem informações qualitativas a respeito da integridade da estrutura, enquanto que a informação quantitativa geralmente é fornecida através de um escalar. Este valor escalar é descrito como desvio da raiz média quadrática por Moura Jr e Steffen Jr (2004) e é descrito pela Eq. (2).

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

onde  $M$  representa a medida da falha,  $Z_{i,1}$  representa o PZT medido sob condições saudáveis e  $Z_{i,2}$  representa o sinal a ser comparado no intervalo de frequência  $i$ .

No entanto, neste trabalho foram utilizados para medição dois sensores PZT e as métricas utilizadas em cada um foram adotadas a correlação do sinal de impedância e a variância como métricas alternativas.

## 1 EXPERIMENTOS

Esta sessão foi subdividida em tópicos para facilitar a compreensão das etapas envolvidas de monitoramento, modelagem e avaliação estocástica.

### 1.1 Estrutura de Testes

O Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) do CTA desenvolveu de 1984 a 1988 o projeto Acauã PD-IPD-8408, uma ANT com propulsão convencional (motor a pistão e hélice) (d'Oliveira, 2003). O ANT Acauã tinha como principal meta o desenvolvimento de uma plataforma de ensaio, com o objetivo da ampliação dos conhecimentos na área de eletrônica, envolvendo controle, telecomando e telemetria (d'Oliveira, 2003).

A estrutura utilizada no trabalho foi uma empenagem vertical retirada do modelo Acauã e é confeccionada em alumínio aeronáutico. O componente pode ser visto na Fig. 2a) (d'Oliveira, 2003). Uma visão da empenagem vertical deste modelo pode ser vista na Fig. 2b).

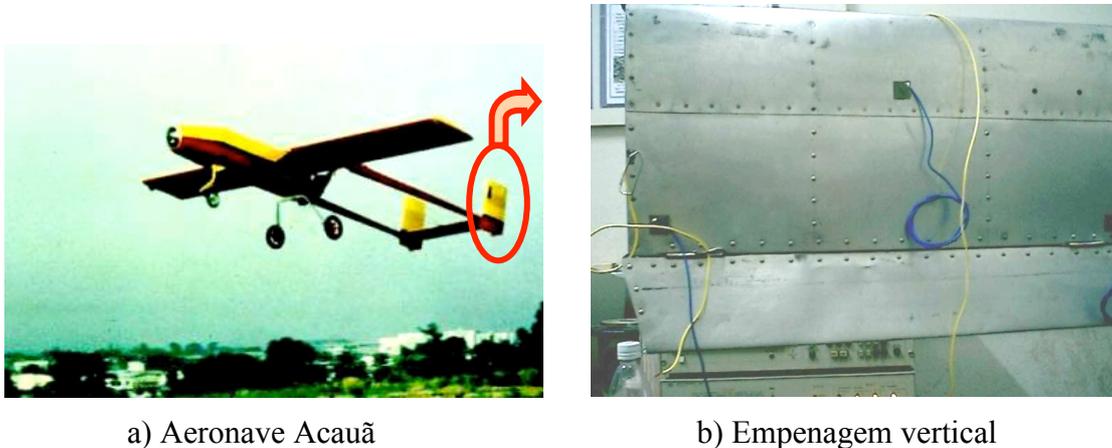


Figura 2. Estrutura utilizada nos testes.

Para o monitoramento da integridade estrutural da empenagem vertical, foram colados três pastilhas PZTs na superfície da estrutura de acordo com as Figs. 3a) e b) que ilustram a estrutura real e uma vista esquemática da peça. Os quadrados representam os três PZTs colados à estrutura, enquanto que os círculos A, B e C representam as condições de adição de massa para simulação de falhas. O retângulo inferior da estrutura caracteriza o leme.

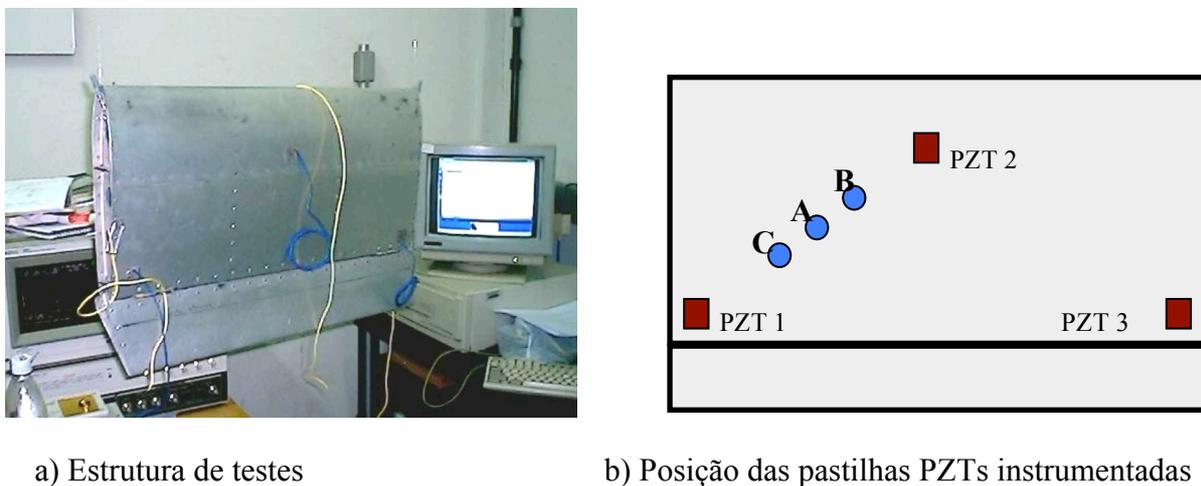


Figura 3. Instrumentação da empenagem vertical.

Os ensaios foram realizados em condições de contorno livre-livre, tendo a estrutura sido fixada por sua borda ao teto através de cabos de nylon, reduzindo ao máximo a rigidez nas condições de contorno.

## 1.2 Coleta de Dados e Ensaios Experimentais

O primeiro fator considerado no experimento foi o valor da massa adicionada, que consiste de pesos de 20 e de 50 g (35 g no ponto central), enquanto o segundo fator, em três níveis, é associado à posição da massa colada (7, 14 e 21 cm distantes do PZT 1). As três possíveis posições podem ser vistas na Fig. 3b).

Foi configurado o analisador de impedância HP4194A para uma faixa de frequência entre 150,5 e 153,5 KHz, sinal módulo da impedância  $|Z|$ , 16 médias, Integ. Med., OSC LEVEL 1 V, e, devido as características do equipamento e como o fenômeno é considerado ergódico, cada PZT foi medido separadamente. Para armazenagem de resultados para treinamento da rede neural, obtenção da superfície de resposta e para validar os dois meta-modelos, foram repetidas seis vezes cada configuração de ensaio.

O planejamento fatorial completo com ponto central pode ser visto na Tab. 1, que ilustra as configurações dos ensaios que foram realizados.

**Tabela 1. Planejamento fatorial completo com ponto central para identificação de falhas da empenagem vertical.**

Ensaio	Massa adicionada	Posição da falha
1	20	C
2	20	A
3	20	B
4	50	C
5	50	A
6	50	B
7	35	A
8	0	-

Na Tab. 2 são ilustrados os sinais para os dois PZTs utilizados na empenagem vertical para identificação de falhas. Nesta tabela os dois sinais correspondem à estrutura íntegra, ou seja, sem falhas.

**Tabela 2. Valores obtidos através dos sinais dos dois PZTs da estrutura sem falha.**

Número do PZT	Correlação do Ensaio 8	Variância do Ensaio 8
1	1	0.666117
2	1	1.17947

Baseado nas seis repetições das sete configurações adotadas, foi possível a obtenção das Tabs. 3-6, que foram utilizadas na análise de falhas em estudo. Nas Tabs. 3-4 são apresentadas, com relação ao PZT 1, as correlações entre cada experimento e o sinal da estrutura sem falha e a variância, respectivamente. Em cada tabela são ilustrados os valores para as seis repetições, as médias e os desvios padrões.

**Tabela 3. Correlação dos sinais medidos no PZT 1 para as sete configurações.**

Número da Repetição	Correlação do Ensaio 1	Correlação do Ensaio 2	Correlação do Ensaio 3	Correlação do Ensaio 4	Correlação do Ensaio 5	Correlação do Ensaio 6	Correlação do Ensaio 7
1	0.765765	0.519584	0.856564	0.762981	0.19389	0.431073	0.048395
2	0.771544	0.585907	0.859601	0.774174	0.15499	0.419815	0.048326
3	0.78431	0.564424	0.861371	0.778695	0.14185	0.331399	0.052775
4	0.787922	0.659322	0.901248	0.782222	0.3213	0.303687	0.093241
5	0.786006	0.669464	0.901144	0.779678	0.34784	0.279965	0.078768
6	0.787042	0.571981	0.896631	0.716122	0.36163	0.279238	0.078623
<b>Média</b>	0.780432	0.595114	0.879427	0.765645	0.253583	0.340863	0.066688
<b>Desvio Padrão</b>	0.009381	0.058167	0.022296	0.025197	0.100908	0.068336	0.019281

**Tabela 4. Variância dos sinais medidos no PZT 1 para as sete configurações.**

Número da Repetição	Variância do Ensaio 1	Variância do Ensaio 2	Variância do Ensaio 3	Variância do Ensaio 4	Variância do Ensaio 5	Variância do Ensaio 6	Variância do Ensaio 7
1	0.304851	0.482742	1.178385	0.722231	0.444505	0.595593	0.367217
2	0.22724	0.708973	1.12796	0.777767	0.406802	0.581278	0.39619
3	0.455299	0.687715	1.096831	0.786939	0.405377	0.460803	0.401554
4	0.462926	0.705285	1.213973	0.635939	0.325333	0.434002	0.312688
5	0.46668	0.696588	1.269398	0.635374	0.341444	0.4242	0.359213
6	0.472088	0.602381	1.200189	0.742048	0.339517	0.424189	0.357317
<b>Média</b>	0.398181	0.647281	1.181123	0.716716	0.377163	0.486678	0.365697
<b>Desvio Padrão</b>	0.105395	0.089806	0.061926	0.06704	0.048143	0.08008	0.032063

Uma observação que pode ser feita é que para a massa adicionada de 20g as correlações são maiores, significando uma menor variação causada por esta falha, quando comparada a uma de intensidade maior.

Nas Tabs. 5-6 são apresentadas, com relação ao PZT 2, as correlações entre cada experimento e o sinal da estrutura sem falha e a variância, respectivamente. Em cada tabela são ilustrados os valores para as seis repetições, as médias e os desvios padrões.

**Tabela 5. Correlação dos sinais medidos no PZT 2 para as sete configurações.**

Número da Repetição	Correlação do Ensaio 1	Correlação do Ensaio 2	Correlação do Ensaio 3	Correlação do Ensaio 4	Correlação do Ensaio 5	Correlação do Ensaio 6	Correlação do Ensaio 7
1	0.99843157	0.99631545	0.998203	0.998763	0.99798	0.998093	0.999314
2	0.99839632	0.99559519	0.998038	0.998797	0.998195	0.998026	0.999439
3	0.99820237	0.99568268	0.997863	0.998934	0.998285	0.997973	0.999459
4	0.99788082	0.99588512	0.997896	0.997862	0.998323	0.997771	0.999508
5	0.99781426	0.99619242	0.997719	0.997873	0.998453	0.997693	0.999522
6	0.99797212	0.99647438	0.997775	0.997795	0.99835	0.997678	0.999521
<b>Média</b>	0.99811624	0.99602421	0.997916	0.998337	0.998264	0.997872	0.99946
<b>Desvio Padrão</b>	0.00026559	0.0003566	0.000178	0.000545	0.000163	0.00018	7.94E-05

Tabela 6. Variância dos sinais medidos no PZT 2 para as sete configurações.

Número da Repetição	Variância do Ensaio 1	Variância do Ensaio 2	Variância do Ensaio 3	Variância do Ensaio 4	Variância do Ensaio 5	Variância do Ensaio 6	Variância do Ensaio 7
1	1.19771516	1.13920357	1.235183	1.164874	1.194967	1.19682	1.17778
2	1.20969184	1.13502772	1.241307	1.166844	1.199761	1.188759	1.189465
3	1.20894918	1.19229065	1.251417	1.177591	1.215986	1.210401	1.187781
4	1.21413149	1.17864082	1.151338	1.187236	1.192799	1.188463	1.167523
5	1.21413149	1.21110897	1.156881	1.181783	1.185271	1.190257	1.183016
6	1.22797127	1.23712033	1.167481	1.183501	1.183258	1.19012	1.179088
Média	1.21209841	1.18223201	1.200601	1.176971	1.19534	1.194137	1.180776
Desvio Padrão	0.00982651	0.0401008	0.046627	0.00917	0.01183	0.008533	0.007963

Destas tabelas, é possível verificar uma redução acentuada da sensibilidade. Considerando a simetria dos experimentos quanto aos dois sensores e a posição das massas de adição, pode-se explicar tal redução.

### 1.3 Redes Neurais Probabilísticas

Foram adotados arbitrariamente (aleatoriamente) cinco ensaios de cada um dos sete casos de falha para o treinamento da rede, enquanto um ensaio de cada configuração da rede foi utilizado para fins de validação. A Tab. 7 apresenta os valores utilizados para o procedimento de identificação de falhas com as seis repetições dos sete casos de falhas. Os valores utilizados para a validação estão marcados em cinza.

Tabela 7. Ensaios utilizados para o treinamento e validação da rede neural.

Ensaio	Repetição					
1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6

Foi utilizado o software Matlab para a criação de uma rede neural probabilística usando os valores das correlações e variâncias dos dois PZTs como parâmetros de entrada. Considerando as cinco repetições da Tab. 7, a rede neural criada possui a arquitetura da Fig. 4.

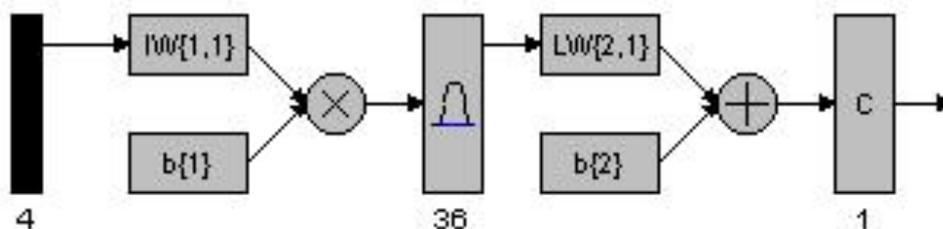


Figura 4. Ilustração esquemática da rede neural probabilística para identificação de falhas na empenagem vertical.



A rede neural probabilística ilustrada pela Fig. 4 retorna um valor escalar correspondente ao tipo de falha mais próxima dos quatro valores inseridos na entrada, comparando-se com os dados das Tabs. 3-6. Este valor escalar de resposta corresponde aos 7 casos de falha e o último, 8, é equivalente ao caso sem falhas.

Os resultados obtidos pela elaboração da rede neural probabilística considerando os casos de teste da Tab. 7 (campos em cinza) ilustraram 100% de acerto quanto à capacidade de detecção das falhas previstas.

#### 1.4 Aplicação do Método de Monte Carlo e Testes

Segundo o método clássico de Monte Carlo, as variáveis de entrada devem ser caracterizadas pelas funções densidade de probabilidade. No caso de variáveis com distribuições normais, pode-se caracterizá-la através da média e do desvio padrão (Prado, 2000).

No estudo de caso em questão, os seguintes passos foram seguidos de forma a se avaliar o potencial estocástico do modelo de previsão de falhas: 1) coleta dos sinais e avaliação das métricas; 2) elaboração das funções densidades de probabilidades de cada variável de interesse; 3) criação de elementos amostrais; 4) testes de condições novas não usadas no treinamento para previsão do tipo de falha, respeitando as funções de densidades de probabilidades de cada métrica (Correlação PZT1, Variância PZT1, Correlação PZT2 e Variância PZT2) para cada um dos 7 tipos de falhas estudados.

Para as distribuições de probabilidade, dadas as características dos sinais de impedância e suas métricas, assim como o baixo número de amostras, todas foram consideradas distribuições normais.

Foi construído um conjunto de dez amostras para a avaliação da rede neural probabilística treinada anteriormente para que seja validada a flexibilidade de detecção da falha sujeita a condições de ruídos que afetem os sinais de impedância, e conseqüentemente as duas métricas das duas pastilhas PZT.

Os casos de falhas criados de forma aleatória foram: *1, 1, 4, 6, 7, 1, 4, 4, 1, 3*. Após a criação das quatro métricas simuladas para as condições específicas anteriores, Correlação do PZT1, Variância do PZT1, Correlação do PZT2 e Variância do PZT2, elas foram inseridas na rede neural probabilística como parâmetros de entrada. As respostas do modelo de redes neurais probabilísticas comparadas com os valores esperados usando as funções densidades de probabilidades é ilustrada na Fig. 5.

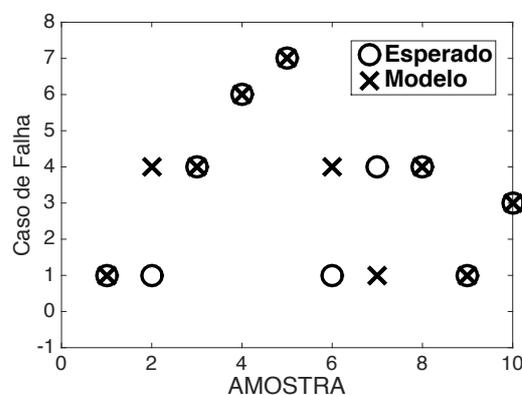


Figura 5. Resultado dos valores simulados estocasticamente como entradas na rede neural probabilística.

Conforme é apresentado na Fig. 5, a rede neural probabilística retornou apenas 70% das respostas corretas, confundindo principalmente os tipos de falha 1 e 4. Observando as métricas dos dois tipos de falhas percebe-se que as duas correlações de ambos sinais não são estatisticamente independentes, sendo utilizados apenas para este tipo de comparação os valores das variâncias.

## 1.5 Conclusões

Foi realizado um experimento de falha simulada por adição de falhas em uma empenagem vertical de um veículo aéreo não tripulado e monitorado pelo método da impedância eletromecânica. Utilizando os sinais de impedância foram construídas quatro métricas para caracterização dos sinais: Correlação do PZT1, Variância do PZT1, Correlação do PZT2, Variância do PZT2. Utilizando estas métricas, foram selecionados algumas amostras de cada caso para construção de uma rede neural probabilística e o restante dos pontos utilizados para condições de teste. Após a validação do modelo de rede neurais um procedimento estocástico foi criado a fim de se representar as quatro métricas para cada condição de falha testada através de curvas de distribuição de probabilidade. Baseando-se em uma amostragem aleatória de seleção de casos de teste, foram selecionados algumas condições para que fossem geradas as métricas baseadas nas distribuições a fim de se validar a capacidade de identificação das falhas pela rede neural em uma condição nova, com ruídos potenciais. O resultado desta segunda etapa do processo apresentou uma taxa de 30% de erros mesmo após a correta calibração do principal parâmetro de dispersão (*spread*) na rede neural probabilística via processo de otimização numérica (busca aleatória). O principal erro evidenciado durante os testes foram que as quatro métricas do tipo de falha 1 é potencialmente confundido com o tipo de falha 4, levando a rede neural probabilística a cometer erros durante estas condições de teste.

Como trabalhos futuros espera-se repetir todo o procedimento realizando testes com outros tipos de arquiteturas de redes neurais assim como métodos de análise de conglomerados.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao IMTec/UFG - Catalão pelo apoio no desenvolvimento do trabalho. Os autores agradecem o suporte financeiro da FAPEMIG, CNPq e CAPES para este trabalho, através do INCT-EIE.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhalla, S., Naidu, A. S. K., e Soh, C. K., 2002a. *Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE*. in Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, December 12–14, Bangalore, India (paper no ISSS-SA-502).

Bhalla, S., Naidu, A.S.K., Ong, C.W. e Soh, C.K., 2002b. *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 Systems, December 16-18, Melbourne, Australia.

Chaudhry, Z., Joseph, T., Sun, F. e Rogers, C., 1995. *Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches*. in Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference, San Diego, CA, Proceedings of the SPIE, Vol.2443.

Chaudhry, Z., Lalande, F., Ganino, A. e Rogers, C., 1996. *Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors*. AIAA-1996-1074-CP.

d'Oliveira, F.A., 2003. *Aeronaves não Tripuladas - ANT - Histórico no CTA e Perspectivas*. www.cta.br, site visitado em 20/10/2003.

Giurgiutiu, V. e Zagrai, A.N., 2000. *Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, 959-976.

Giurgiutiu, V. e Zagrai, A.N., 2002. *Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification*. Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 124, pp. 1-10.

Giurgiutiu, V, Zagrai, A., e Bao, J.J., 2002. *Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring*. International Journal of Structural Health Monitoring, Vol. 1, 41–61.

Giurgiutiu, V., Zagrai, A. N., Bao, J., Redmond, J., Roach, D. e Rackow, K., 2003. *Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures*. International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Vol. 6, No. 1, 3–21.

Liang, C., Sun, F.P., e 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, Vol. 5, 12–20.

Moura Jr, J.R.V. e Steffen Jr, V., 2004. *Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation*. XXII IMAC, Dearborn, MI, USA.

Moura Jr, J.R.V e Steffen Jr, V., 2006. *Impedance-based Health Monitoring for Aeronautic Structures using Statistical Meta-modeling*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 17, p. 1023-1036.

Moura Jr, J.R.V, 2008. *Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia.

Naidu, A. Bhalla, S. e Soh, C.K., 2002. *Incipient Damage Localization with Smart Piezoelectric Transducers using High-Frequency Actuation*. in Proceedings of SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, December 16–18, Melbourne, Australia.

Park, G., Kabeya, K. Cudney, H. H., e Inman, D. J., 1999a. *Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications*. JSME International Journal, Series A, Vol. 42, No. 2, 249–258.

Park, G., Cudney, H. e Inman, D., 1999b. *Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures*. In Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Proceedings of the SPIE, Vol. 3670, 461–469.

Park, G., Cudney, H., e Inman, D. J., 2000a. *Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components*. ASCE Journal of Infrastructure Systems, Vol. 6, No. 4, 153–160.

- Park, G., Cudney, H., e Inman, D.J., 2000b. *An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, No. 6, 448–455.
- Park, G., Cudney, H., e Inman, D.J., 2001. *Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal, Vol. 30, No. 10, 1463–1474.
- Park, G, Sohn, H., Farrar, C.R. e Inman, D.J., 2003. *Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward*. The Shock and Vibration Digest, Vol. 35, No. 6, November 2003, pp. 451-463.
- Prado, D.S. 2000. *Teoria das Filas e da Simulação*. Editora INDG.
- Raju, V., 1997. *Implementing Impedance-Based Health Monitoring*. MSc Thesis, Virginia Tech, USA.
- Soh, C.K., Tseng, K, Bhalla, S. e Gupta, A., 2000. *Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge*. Smart Materials and Structures, Vol. 9, 533–542.
- Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C. e Rogers, C.A., 1995. *Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 6, 134–139.