http://journal.unoeste.br/index.php/ca/index
DOI: 10.5747/ce.2019.v11.n4.e298
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 15/07/2019 Revisado: 06/09/2019 Aceito: 16/09/2019

DETECÇÃO DE FALHAS ESTRUTURAIS DE UM PRÉDIO DE DOIS ANDARES UTILIZANDO SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL

DETECTION OF STRUCTURAL FAULTS OF A TWO-STORY BUILDING USING ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM.

Thiago Carreta Moro[1], Fábio Roberto Chavarette[1], Luiz Gustavo Pereira Roéfero[1], Roberto Outa[2]

[1]Universidade Estadual Paulista – UNESP. [2]Faculdade de Tecnologia de Araçatuba-FATEC.
E-mail: thiago.moro@unesp.br

RESUMO – Este trabalho apresenta a proposta inovadora para o desenvolvimento de SHMs com foco em ciber-sistemas físicos aplicados em um prédio de dois andares baseado em técnicas de computação inteligente (CI), o algoritmo de seleção negativa oriundo do Sistema Imunológico Artificial, para realizar a análise e monitoramento da integridade estrutural em um edifício.
Palavras-chave: Detecção de Falhas, Monitoramento de Integridade Estrutural, Sistema Imunológico Artificial

ABSTRACT - This work presents the innovative proposal for the development of SHMs with focus on physical cyber systems applied in a two-story building based on Intelligent Computing (CI) techniques, the negative selection algorithm from the Artificial Immune System, to perform the analysis and monitoring of structural integrity in a building
Keywords: Detection, Structural Health Monitoring, Artificial Immune System

1. INTRODUÇÃO

Com a quarta revolução industrial o modelo ciber-físicos exigiu a reestruturação da indústria do século XXI. As Industrias 4.0, definidas pela implementação do modelo ciber-fisicos, são computacionais e constituídas de sistemas colaborativos nos quais as operações são monitoradas, coordenadas, controladas e integradas por comunicação e núcleos computacionais com o objetivo de transformar a interação do ser humano com o mundo físico. (MAGRUK, 2016)

Assim, sistemas de monitoramento e diagnóstico tendem a se tornar parte do sistema ciber-físico num futuro próximo, como resultado do desenvolvimento de novas tecnologias, processamento de sinais e métodos de interpretação para métodos eficientes de análise da integridade das estruturas, prevenindo catástrofes e / ou acidentes, garantindo assim a vida das pessoas e evitando perdas econômicas. (HUXTABLE, 2016)

Dentro desse conceito que se estabelece o Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural (MIE). De uma forma concisa, o MIE, é descrito como um método de implementação de estratégias, na identificação de falhas estruturais, sendo capaz de executar tarefas como: aquisição e processamento de dados, validação e análise; possibilitando a identificação e interpretação de mudanças adversas em uma estrutura, visando facilitar tomada de decisões e garantir a segurança, em métodos não destrutivos. (GOPALAKRISHNAN, 2011)

Dentro da literatura é verificado muitos trabalhos tradicionais com foco no MIE como estabelecidos em Balageas *et al.* (2010), e Abreu (2014). Estes trabalhos têm por base: inspeção ultrassônica, raio X, acústicos testes de emissões, entre outras técnicas.

Estes trabalhos tradicionais apresentam uma boa metodologia e bons resultados, entretanto estas técnicas apresentam um alto custo com aparelhos específicos e neste caso o pior ponto, não são capazes de abranger a totalidade de grandes estruturas civis, como o caso de uma ponte ou um prédio foco deste trabalho.

Este trabalho apresenta a proposta inovadora para o desenvolvimento de SHMs com foco em ciber-sistemas físicos aplicados em um prédio de dois andares, baseada em técnicas de computação inteligente (CI), o algoritmo de seleção negativa (FORREST *et al.*, 1994) para realizar a análise e monitoramento da integridade estrutural em um edifício. A partir da aquisição e processamento dos sinais, aplica-se o algoritmo de seleção negativa (ASN), para identificar e caracterizar as falhas através da dinâmica estrutural. Para avaliar este método, utilizou-se a técnica de shear building associado a materiais inteligentes que atuam como sensores.

2.METODOLOGIA EXPERIMENTAL

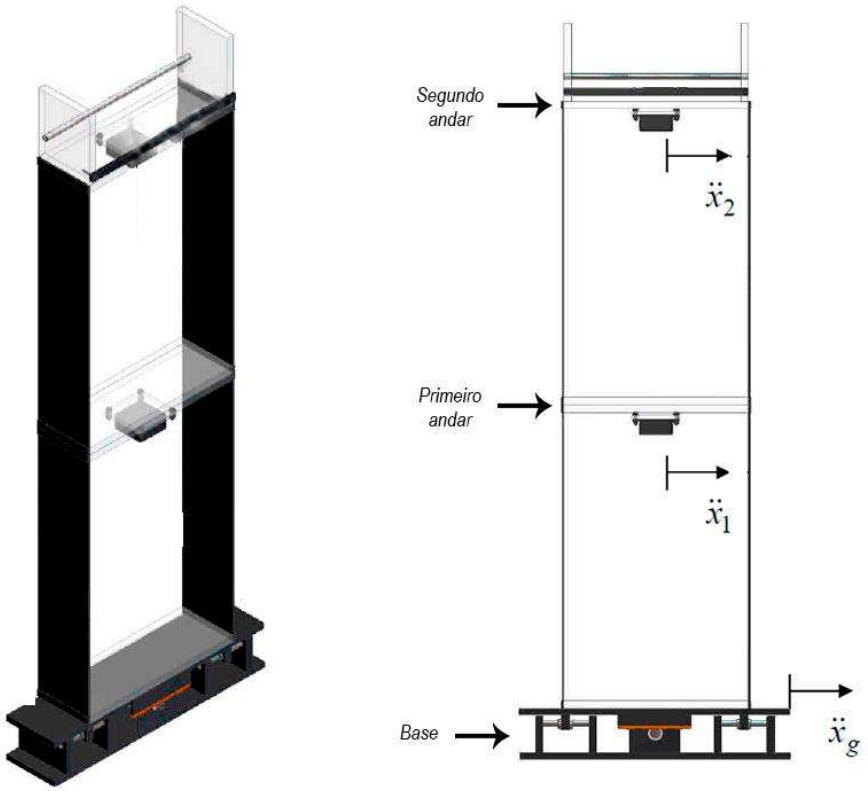
Independentemente do modo, as falhas estruturais são consequência de fatores naturais e forçantes que modificam os parâmetros espaciais e consequentemente ocasionam a repercussão nas características dinâmicas estruturais: funções de respostas em frequência, frequências de ressonância, razão de amortecimento e modos próprios da estrutura. (ATALLA; SGARD, 2010
).

Por isso, a metodologia tem por objetivo a captação da reposta dinâmica da estrutura em um estado normal e em um estado de falha, respeitando a avaliação não destrutiva.

2.1 APARATO EXPERIMENTAL

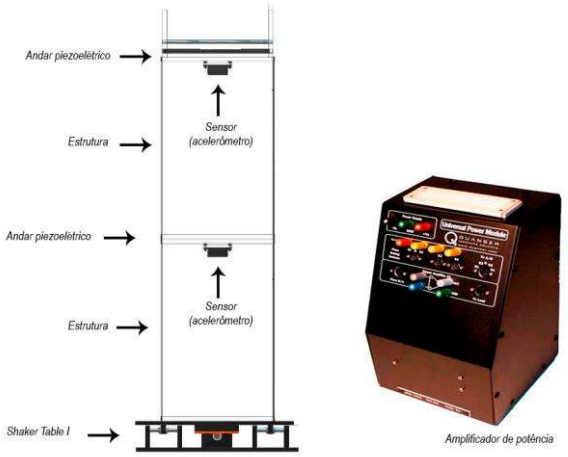
Este artigo apresenta a proposta de uma metodologia baseada no modelo de shear building de um prédio de dois andares representado na Figura 1 e seus aparatos experimentais representado pela Figura 2.

Figura 1. Modelo Experimental



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 2. Aparatos Experimentais



Fonte: elaborado pelo autor

O Modelo de shear building caracteriza uma estrutura real em uma ótica reduzida e com algumas simplificações destacadas por Silvia como:

- Somente o deslocamento horizontal
- As massas são concentradas sobre os nós estruturais
- Despreza-se as massa das colunas,
- Rigidez infinitas das lajes,

- As ações são aplicadas apenas nos planos dos pórticos,
- A curva de tensão/deformação é considerada elasto- plástica ideal

Através dessas simplificações que se baseia a estrutura utilizada, sendo esta composta por uma estrutura manufaturada pela *Quanser Consulting Inc*, constituída por uma armação de aço que representa um edifício flexível desenvolvida com dois andares.

A estrutura é dimensionada com 1125 mm de altura, sendo cada coluna de aço com uma seção de 1,75x108 milímetros. A massa total da estrutura é de 4,52 kg, onde a massa do primeiro piso m_1 é de 1,16 kg, a massa do segundo piso m_2 é 1,38 kg.

O shaker table, ou mesa de agitação, localizado na base do modelo de edifício, produz uma força externa na base da estrutura, definindo uma aceleração $\ddot{x_g}$. Este agitador é responsável neste trabalho por excitar a estrutura analisada.

Cada piso dos andares, apesenta um capacitor DC acelerômetro piezoeléctrico. Sendo este material inteligente utilizado para captar as acelerações $\ddot{x_1}$ e $\ddot{x_2}$ resultantes da excitação da mesa de agitação.

Além dos elementos que compõem o modelo do edifício de dois andares, usou-se um amplificador de potência, responsável por alimentar a mesa de agitação. O amplificador, de modelo UPM 1503 manufaturado pela *Quanser Consulting In*.

O modelo do edifício junto com o amplificador, foi fixado em uma mesa inercial. Esta tem por objetivo garantir a estabilidade do experimento, reduzindo os ruídos experimentais.

2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para uma análise estabelecida em variadas amplitudes de excitação, optou-se por uma excitação do tipo El centro, representada pelo modelo estocástico de terremotos de Kanai-Tajimi (Wg), definido, segundo Kanai (1961), por

$$Wg = \frac{\sqrt{So\left(2\zeta_g\varphi_g + \varphi_g^2 \right)}}{s^2 + 2\zeta_g\varphi_g + \varphi_g^2} \qquad (1)$$

Este modelo foi reproduzido pela mesa de excitação e tem por parâmetros iniciais S_0= 0.005, ζ_g= 0.5 e φ_g= 15rad/s.

Qualquer estrutura é excitada por diferentes frequências, oriundas por diferentes fontes de excitação, como por exemplo a ação do vento, a ação da movimentação de veículos, a solicitação estrutural entre outros.

Por isso a escolha de uma excitação sísmica que neste caso, por apresentar um tempo e uma potência diminuta, não apresenta risco a estruturais ao modelo predial e possibilita um monitoramento completo da estrutura frente às várias fontes de excitação.

Com relação a captação dos sinais, os sinais não próprios da estrutura representam os modos de falhas possíveis que alteram os parâmetros espaciais. Buscando um ensaio não destrutivo, utilizou-se massas adicionais nos andares da estrutura modificando a resposta dinâmica.

Com relação aos sinais próprios, uma estrutura normal, dentro da literatura, pode apresentar um acréscimo diminuto de massa, oriundo do desvio padrão da heterogeneidade dos materiais que a compõem, desde que não haja reflexos na dinâmica estrutural. Por isso, utilizou-se um acréscimo diminuto de massa na captação de sinais normais (cerca de 1% do peso dos pisos), além da estrutura sem acréscimos de massa.

Portanto, este procedimento experimental tem por possibilidades a captação de 121 sinais. Destes, 4 sinais são da estrutura em estado normal e 117 em estado de falha.

Após a captação dos sinais, aplicou-se a transformada de Fourier. Através da mudança para o espectro de frequência é possível uma análise pico a pico da amplitude de resposta

4. SISTEMA IMUNOLOGICO ARTIFICIAL: ALGORITIMO SELEÇÃO NEGATIVA

O corpo humano é constituído por inúmeros sistemas que, em sincronia, mantem o organismo funcionando sem defeitos fatais. Dentre os Sistemas, o Imunológico é sem dúvida um dos mais importantes a sobrevivência dos seres vivos.

Isto é destacado pelo Calich *et al.* (2001), sem um mecanismo de defesa os animais estariam a mercê de inúmeros agentes infeciosos presentes no ambiente que invadiriam o corpo humano e causariam o colapso dos sistemas que o compõem.

Esse complexo sistema, chama muito a atenção do ponto de vista biológico e de engenharia devido as propriedades que incluem o reconhecimento de padrões, autonomia, detecção de anomalias, tolerância a ruído, entre muitas outras (DE CASTRO, 2001).

Assim, com advento da Computação Inteligente, em 1990 surge o Sistema Imunológico Artificial (SIA) que tem por princípio algoritmos inovadores com paráfrases do Sistema Imunológico Biológico, absorvendo assim as propriedades desse importante sistema humano.

Segundo De Castro (2002) o SIA é um marco de evolução da computação inteligente sendo denominado por ele como uma engenharia imunológica.

Isto é baseado na característica de metassíntese, o qual define ferramentas de solução ou otimização de problemas baseando-se nas características do próprio problema, para posterior resolução. Com isso, foge do paradigma da reconstrução parcial ou total do sistema, buscando implementar modelos pragmáticos que preservem algumas das propriedades essenciais e que se mostrem passiveis de implementação computacional e eficaz no desenvolvimento de ferramentas de engenharia.

É dentro deste contexto tecnológico e inovador que nasce o Algoritmo de Seleção Negativa (ANS).

Este algoritmo proposto por Forrest *et al.* (1994), baseia-se no processo de seleção que ocorre no interior do Timo no processo de diferenciação das células linfáticas em próprias e não próprias ao corpo (LIMA, 2016).

Assim o ANS presenta a característica de detectar mudanças em estados de sistemas atuando no reconhecimento de padrões e na detecção de anomalias sendo, além do uso e materiais inteligentes, o diferencial e revolucionário do MIE para atuar na área estrutural.

Estas propriedades são consequências do funcionamento do algoritmo por meio do método de casamento. O critério de casamento ou combinação, segundo Forrest *et al.* (1994), é utilizado para avaliar afinidade entre as cadeias (antígeno e anticorpo) e comprovar se estas são semelhantes ou iguais. Este casamento pode ser perfeito ou parcial.

Se o casamento for perfeito, significa que as duas cadeias analisadas apresentam os mesmos valores e logo ambas devem ser perfeitamente iguais. Entretanto, se apenas uma quantidade de posições entre os padrões possuírem o mesmo valor este casamento é definido como parcial.

O antígeno (Ag) é o sinal a ser analisado no algoritmo de seleção negativa e pode ser representado pela expressão (2). Os detectores representam os anticorpos (Ab) e são expressos de acordo com a expressão (3) (de Castro, 2001).

$$Ag = Ag_1, Ag_2, Ag_3, Ag_4, \dots, Ag_l \quad (2)$$

$$Ab = Ab_1, Ab_2, Ab_3, Ab_4, \dots, Ab_l \quad (3)$$

Neste caso, a quantidade de posições iguais obedece a um limiar preestabelecido e denominado taxa de afinidade.

Conforme Lima (2017), o casamento perfeito entre as cadeias e dados é quase impossível de ser alcançado experimentalmente, devido as inúmeras variáveis que permeiam e alteram os dados empíricos. Por isso a utilização do casamento

parcial e a taxa de afinidade mostram-se muito mais vantajosos.

A taxa afinidade utilizada como o grau de semelhança necessário para que ocorra o casamento parcial, avaliada para os números reais, é definida, de acordo com Lima (2014) como:

$$TAf = \left(\frac{An}{At} \right) * 100 \qquad (1)$$

Sendo:

TAf : taxa de afinidade;
An : número de cadeias normais no problema (cadeias próprias);
At : número total de cadeias no problema (cadeias próprias e não-próprias)

Além da Taxa de afinidade, para analisar os padrões de cadeia é utilizado a Afinidade total, definida como:

$$Af_T = \frac{\sum_{i=1}^{L} Vc}{L} * 100 \qquad (2)$$

Sendo:

Af_T : % de afinidade entre os padrões analisados;
L : quantidade total de variáveis;
Vc : variáveis casadas;
$\sum_{i=1}^{L} Vc$: somatória (quantidade) de variáveis casadas.

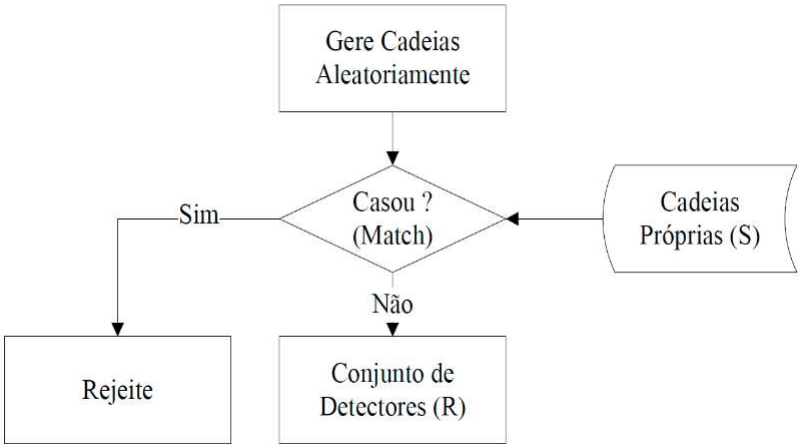
Assim, caso Af_T for maior ou igual ao TAf ocorre o casamento perfeito e as cadeias são consideradas semelhantes. Por outro lado, se a Af_T for menor que a TAf, o detector não reconhece a cadeia, e logo não ocorre o casamento entre os padrões.

Utilizando, portanto, o casamento parcial, o ANS é segmento em duas fases iterativas: Censoriamento e Monitoramento

Na fase de Censoriamento do ASN, representada pela Figura 1, são definidos os detectores próprios, conhecidos também como cadeias próprias (S), representam a condição normal do problema. Em seguida, é produzido o conjunto de detectores (R), que possuem a capacidade de reconhecer padrões não próprios. Portanto, com a leitura dos dados, verifica-se a afinidade de cadeias aleatórias, comparando estas cadeias ao conjunto de cadeias próprias.

Se a afinidade estiver a cima de um limiar preestabelecido a cadeia é rejeitada. Entretanto se a afinidade estiver abaixo do limiar, a cadeia é adicionada ao conjunto de detectores, denominado também por *Baseline*, sendo utilizada na classificação durante o monitoramento dos dados.

Figura 3. Fluxograma Censoriamento

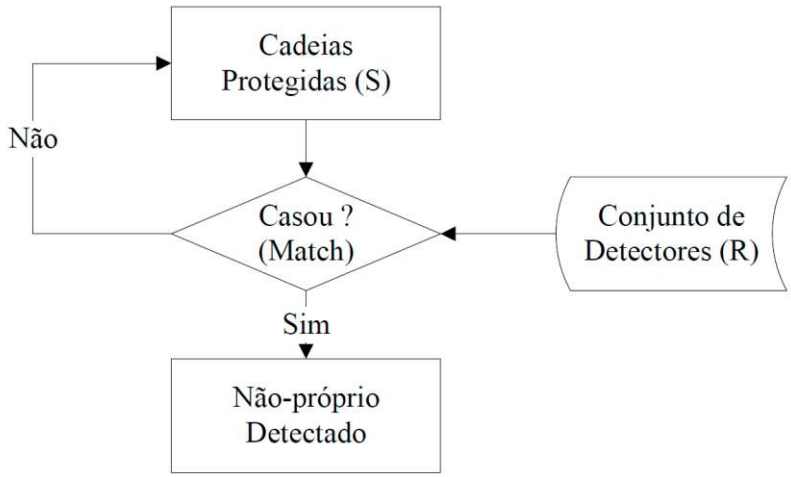


Fonte: Lima (2016)

Na fase de monitoramento, representada pela Figura 2, é realizado o monitoramento dos dados com o objetivo de identificar anomalias de comportamento das amostras. Assim, com o conjunto de detectores, oriundos da fase de Censoriamento, classificar esta anomalia.

Deste modo, comparando as cadeias protegidas (S) com o conjunto de detectores (R), afere-se a afinidade entre as cadeias. Caso a afinidade seja superior a um limiar preestabelecido, e identificado e classificado um elemento não próprio.

Figura 4. Fluxograma Monitoramento



Fonte: Lima (2016)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

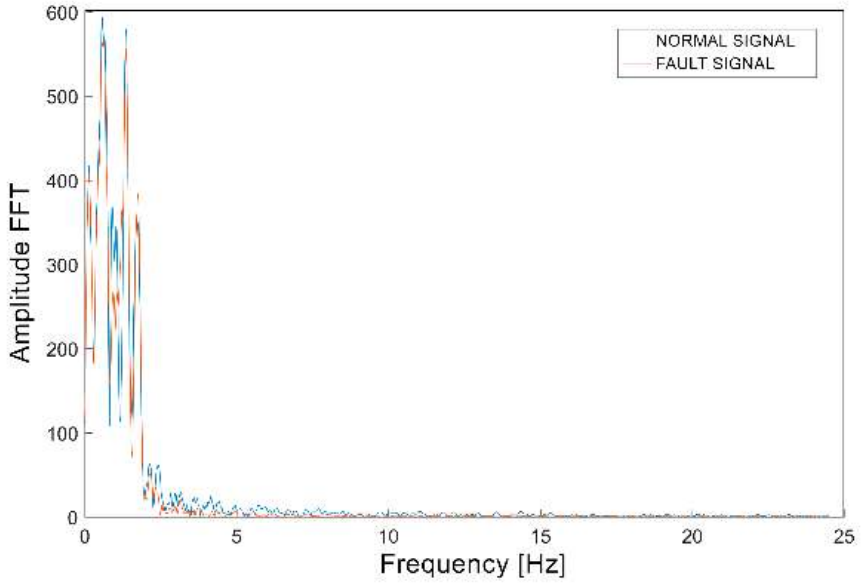
A evolução do MIE neste trabalho tem por vertente a utilização dos materiais inteligentes para a captação de dados e em segundo ponto a utilização do Sistema Imunológico Artificial para um processamento mais eficiente.

5.1 MATERIAIS INTELIGENTES

Logo por resultados iniciais, a captação de dados mostrou-se eficaz e economicamente viável, pois possibilitou o sensoriamento global da estrutura com uso de dois sensores piezoeléctricos.

Isso é comprovado pela Figura 5, ao plotar um sinal próprio (sinal da estrutura normal) da estrutura e um sinal não próprio(sina da estrutura em modo de falha) da estrutura, após a Transformada de Fourier, verifica-se uma diferença de amplitude entre os sinais indo ao encontro de Atalla e Sgard (2015): a mudança do parâmetro espacial (acréscimo de massa) altera a resposta em frequência; dando confiabilidade ao sistema de captação baseado em materiais inteligentes.

Figura 5. Sinais captados da estrutura



Fonte: Os autores.

Relativamente em uma estrutura predial seria necessário o uso de mais sensores piezoeléctricos, entretanto, seu domínio global e possibilidade de monitoramento instantâneo já supera o uso das técnicas tradicionais que apresentam deficiência de domínio e alto índice econômico.

5.2 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

Para verificar a eficiência do algoritmo de seleção negativa, recorreu-se a subdivisão do processamento dos sinais estruturais em três situações: Processamento Sequenciado, Randômico Não Próprio e o Randômico Decrescente Próprio.

Para garantir a normalidade com base na curva padrão dos resultados amostrais, baseado em SNEDECOR *et al.* (1989), realizou-se trinta iterações do algoritmo com os dados estruturais (sinais) para cada tipo de processamento.

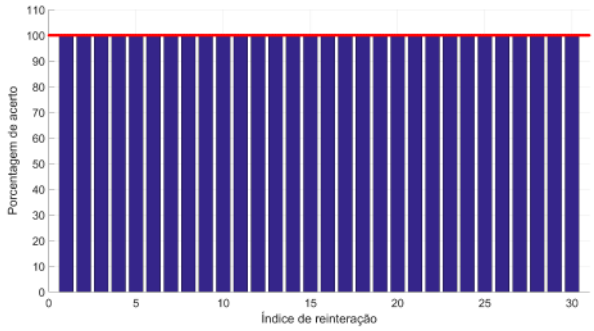
5.2.1 PROCESSAMENTO SEQUENCIADO

O Processo Sequenciado tem por princípio uma verificação do funcionamento correto do algoritmo. Este processamento é caracterizado pela entrada sequencial de sinais, ou seja, os sinais que alimentam o algoritmo são ordenados do melhor caso para o pior caso de falha.

O processo sequenciado foi definido com 4 sinais próprios e 117 sinais não próprios.

Assim obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na Figura 6. Observando o valor médio representado pela linha vermelhas, houve uma Taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.05 segundos.

Figura 6.



Fonte: Os autores.

Observando o processamento sequenciado, o algoritmo apresentou uma eficiência máxima, validando, portanto, o funcionamento correto do algoritmo. Ao alimentar o ANS com os mesmos sinais estabelecidos na memória inata do algoritmo (Fase de Censoriamento), deve-se haver o auto reconhecimento e consequentemente o acerto máximo (FORREST *et al.,* 1994).

5.2.2 PROCESSAMENTO NÃO PRÓPRIO

Neste método foi utilizado fixamente quatro sinais normais e variado, randomicamente, o número de sinais não próprios estruturais a cada iteração. Com esse método, é avaliado a eficiência do algoritmo para variadas taxas de afinidade e, também, a relação entre o processamento e o conhecimento a respeito dos sinais com falhas.

Por isso a Tabela 1, representa para as trintas interações realizadas, o número de sinais com falha usados.

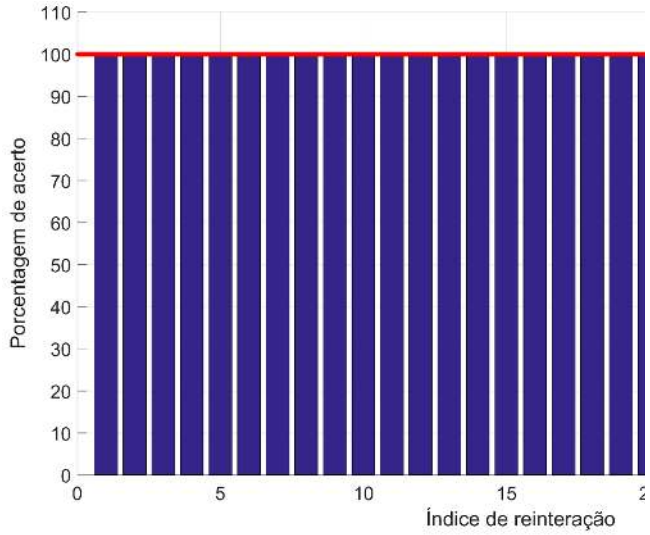
Tabela 1. Numero de sinais com seus índices

Iteração	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sinais Não proprios	7	105	76	16	113	73	23	81	35	66	14	105	10	25	25
Iteração	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Sinais Não proprios	33	107	116	21	85	66	50	41	15	99	37	71	117	97	92

Obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na Figura 10.

Observando o valor médio houve uma Taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.0504 segundos.

Figura 7.



Fonte: Os autores.

O processamento Randômico não próprio, caracteriza uma analise a respeito da precisão do algoritmo em várias taxas de afinidade (diversificados valores de sinais com falha). Observando o gráfico de acertos, denota-se que a variação do número de sinais não próprios, que é avaliada, não influencia a taxa de acerto, afinal esta foi de 100%.

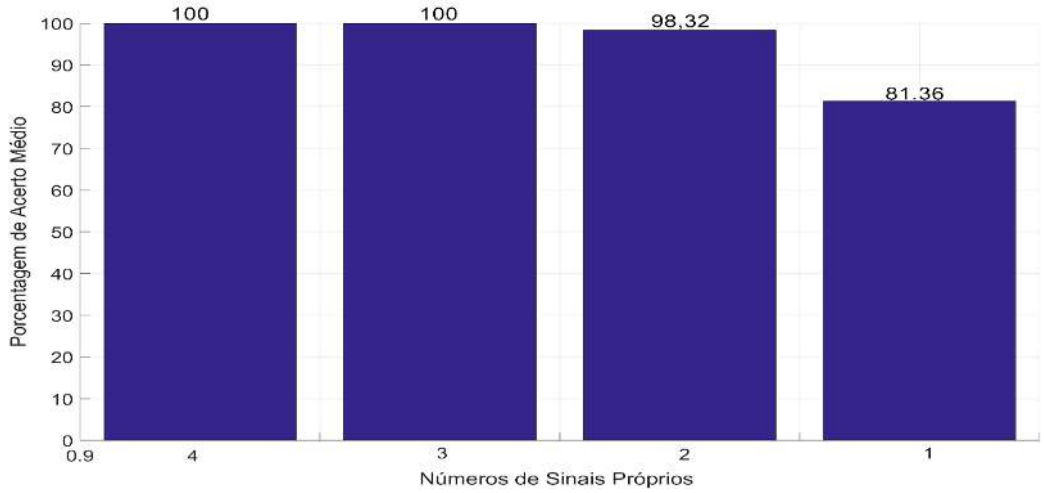
Logo, independentemente do modo de falha que a estrutura ficar susceptível o MEI proposto o detectará.

5.2.3 PROCESSAMENTO PRÓPRIO

Neste método foi utilizado fixamente 117 sinais com falhas e variado, decrescentemente, o número de sinais próprios estruturais a cada interação. Com esse método, é avaliado a eficiência do algoritmo para uma situação em que o mesmo não apresenta um aprendizado completo a respeito da estrutura monitorada.

Como este banco é constituído por quatro sinais normais desenvolveu-se uma entrada decrescente do número de sinais sem falha iniciando com quatro sinais, e finalizando com um sinal, o índice de acerto médio é representado concisamente na Figura 8 para cada número de sinais normais.

Figura 8. Comparação do próprio



Fonte: Oa autores.

Através desses gráficos, denota-se que a precisão do Algoritmo de Seleção Negativa é oriunda do aprendizado desenvolvido na etapa de Censoriamento. Logo, é evidente que quanto mais sinais próprios, maior será aprendizado e, consequentemente, o algoritmo terá uma maior precisão e acurácia.

5.CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma inovadora constituição de Monitoramento de Integridade Estrutural alicerçado em sensores de materiais inteligentes e na implementação do Sistema Imunológico Artificial indo ao encontro da filosofia ciber-física da quarta revolução industrial.

Isto é demonstrado pelos resultados obtidos afinal mesmo tendo um baixo aprendizado por parte do ANS, o MEI proposto apresentou uma acurácia e precisão superior a 80% associado a um tempo de processamento inferior a um segundo.

Portanto, observando o trabalho total, este Sistema Monitoramento da Saúde Estrutural aplicado ao modelo predial, caracteriza uma revolução ao ramo estrutural, pois, transforma o principal o determinante estrutural em um "corpo humano". Ou seja, em uma máquina complexa e perfeita com todas as suas partes funcionando em sincronia e sem falhas potenciais.

AGRADECIMENTO

Este trabalho não seria possível sem o apoio financeiro oferecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPESP), através dos processos 2018/06573-6 e 2019/10515-4. Por isso, os autores agradecem o apoio e a confiança depositada nesta pesquisa.

Além disso, agradeço a UNESP-Universidade Estatual Paulista por proporcionar a oportunidade de estar no meio acadêmico e suporte técnico para esta pesquisa.

E por último, mas não menos importante agradeço ao Sisplexo, o laboratório onde trabalho e onde tenho uma segunda família.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. C. E., CHAVARETT, F. R., ALVARADO, F. V., DUARTE, M. A. Q., LIMA, F. P. A. , Dual-Tree Complex Wavelet Transform Applied to Fault Monitoring and Identification in Aeronautical Structures. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 97, n.1, p. 89-97, 2014. https://doi.org/10.12732/ijpam.v97i1.9

ATALLA, N.; SGARD, F. Finite element and boundary methods. *In:*
BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.-P.; ;GUEMES, A.. **Structural health monitoring**, [S.l.]: John Wiley Sons, 2010, v. 90.

CALICH, V. L. G.; VAZ, C. A. C.; ABRAHAMSOHN, I. D. A.; BARBUTO, J. A. M.; ISAAC, L.; RIZZO, L. V.; MACEDO, M. S.; RUSSO, M.; JANCAR, S.**Imunologia**. São Paulo: Revinte, 2001.

CASTRO, L. N.**Engenharia imunológica:** desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais. 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

DE CASTRO, L. N.; TIMMIS, J. **Artificial immune systems: a new computational intelligence approach**. New York: Springer, 2002. p. 357.

FORREST, S.; PERELSON, A. S.; ALLEN, L.; HERUKURI, R. **Self-nonself discrimination in a computer**. In Research in Security and Privacy, 1994. Proceedings., 1994 IEEE Computer. https://doi.org/10.1109/RISP.1994.296580

Gopalakrishnan, S., Ruzzene, M., Hanagudh, S., 2011, **Computational techniques for Structural Health Monitoring**, Springer Science Business Media. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-284-1

Huxtable, J., Schaefer, D., 2016. **On Servitization of the Manufacturing Industry in the UK**. Procedia CIRP 52, 46-51. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.042
https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.042

Kanai, K., 1961, **An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions, Bulletin earthquakes research institute**, University of Tokyo 39, 85-95

LIMA, F. P. A.; CHAVARETTE, F. R.; SOUZA, S. S. F.; LOPES, M. L. M.. **Monitoring and Fault Identification in Aeronautical Structures Using an Wavelet-Artificial Immune System Algorithm**. Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems. São Paulo: Springer International Publishing AG, 2017. Chaim, 1-17.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-55852-3_13

MAGRUK, A.**Uncertainty in the Sphere of the Industry 4.0**–Potential Areas to Research. Business, Management and Education, v. 14, n. 2, p. 275-291, 2016. https://doi.org/10.3846/bme.2016.332

SNEDECOR, G. W.; COCHRAM, W. G. **Statistical Methods**. 8rd ed. Iowa: Iowa State University Press, 1989.

SOCIETY SYMPOSIUM.. Ieee.**Structural acoustics and vibration**. CRC Press, 2015 p. 202–212. https://doi.org/10.1109/RISP.1994.296580