http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2020.v12.n2.e316
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 15/06/2020 Revisado: 20/08/2020 Aceito: 25/08/2020

DETECÇÃO DE FALHAS ESTRUTURAIS EM UM PORTICO METÁLICO UTILIZANDO A COMPUTAÇÃO INTELIGENTE

Thiago Carreta Moro[1], Fábio Roberto Chavarette[1], Igor Feliciani Merizio[1], Roberto Outa[2]

[1]Universidade Estadual Paulista – UNESP. [1]Faculdades de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC, Araçatuba, SP.
E-mail: igorfeliciani@gmail.co

RESUMO - O pórtico metálico, é uma das principais composições estruturais de postos de combustíveis, pontes e aranha céus. Todavia, tais estruturas apresentam vulnerabilidade as solicitações ambientais, temporais e antropológicas, gerando desgastes que podem levar essas estruturas ao colapso. Com os avanços tecnológicos da Quarta revolução industrial, houve a transformação da relação do espaço físico e o homem, denominado modelo Ciber Físico Essa evolução tecnológica superou as paredes das Industrias 4.0, e se instaurou também no Ramo civil resolvendo os problemas de insegurança estrutural, reciproco ao pórtico metálico através do Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural

Por isso, este trabalho de pesquisa apresenta uma proposta inovadora para o desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural aplicado para Pórticos Metálicas com a tomada de decisões baseado na Computação Inteligente. Com isto, este trabalho busca não só implementar o Sistema de Monitoramento da Integridade Estrutural para garantir a segurança em pórticos metálicos, mas também otimizar seu funcionamento com tomada de decisões baseada no Sistema Imunológico Artificial, por intermédio do Algoritmo de Seleção Negativa

Observando os resultados, este trabalho provou ser eficiente, robusto e economicamente viável, tendo um alto desempenho, representando a medida perfeita Ciber Fisica no monitoramento Pórticos Metálicos e resolução dos seus problemas estruturais.

Palavras-chave: Detecção de Falhas, Monitoramento de Integridade Estrutural, Sistema Imunológico Artificial

DETECTION OF STRUCTURAL FAILURES IN A METALLIC PORTICO USING INTELLIGENT COMPUTING

ABSTRACT - The Metal Gantries is one of the main structural compositions of gas stations, bridges and sky spiders. However, such structures are vulnerable to environmental, temporal and

anthropological demands, generating wear and tear that can cause these structures to collapse. With the technological advances of the Fourth Industrial Revolution, there was a transformation of the relationship between physical space and man, called the Cyber-Physic model. This technological evolution surpassed the walls of Industries 4.0, and was also established in the civil branch, solving the problems of structural insecurity, reciprocal to the metallic portico through the Structural Health Monitoring Therefore, this research work presents an innovative proposal for the development of a Structural Health Monitoring applied to Metal Gantries with decision making based on Intelligent Computing

With this, this work seeks not only to implement the Structural Health Monitoring to guarantee safety in metallic frames, but also to optimize its operation with decision making based on the Artificial Immune System, through the Negative Selection Algorithm. Observing the results, this work proved to be efficient, robust and economically viable, having a high performance, representing the perfect Cyber-Physic measure in the monitoring of Metal Gantries and resolution of its structural problems.

Keywords: Detection, Structural Health Monitoring, Artificial Immune System

1. INTRODUÇÃO

No ramo da Engenharia Civil, os pórticos metálicos compõem a maior parte do ramo estrutural de postos de combustíveis, pontes e arranhas céu. Seu uso está associado ao ganho de velocidade e eficiência oriundo do material metálico, redução das cargas de fundação e à otimização da área útil, proporcionando maior vantagem econômica

Todavia, tais estruturas estão suscetíveis, além dos fatores solicitantes, aos fatores de degradação, os quais comprometem a sua organização estrutural: corrosão, fadiga e vibrações.

Com os avanços tecnológicos da Quarta revolução industrial, houve a transformação da relação do espaço físico e o homem, denominado modelo Ciber-Fisico. Dessa forma, o homem superara o marco robótico e avançaram para meios computacionais, constituídos de sistemas colaborativos, nos quais, as operações são monitoradas, coordenadas, controladas e integradas através de comunicação e de núcleos computacionais. (MAGRUK, 2016; POPKOVA,2019)

Essa evolução tecnológica superou as paredes das Industrias 4.0, e se instaurou também no Ramo Civil para resolver os problemas de insegurança estrutural, reciproco ao do pórtico metálico através do Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural. (CHEN,2018; MORO, 2019)

O Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural (referenciado do inglês por SHM), de uma forma concisa, 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. (DHAPEKAR, 2016; GOPALAKRISHNAN, 2011)

Por isso, o interesse pelo Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural nas Estruturas metálicas (entre elas o Pórtico metálico) tem aumentado de maneira significativa, seja pela comunidade acadêmica para o seu aperfeiçoamento, seja pelos setores do mercado para o prolongamento da vida útil do complexo estrutural metálico e assim evitar possíveis desastres ambientais, percas econômicas e principalmente acidentes catastróficos que resultam na morte de pessoas (ABREU et al, 2014; FARRAR,2013)

Dentro desse conceito que se estabelece este trabalho, apresentando uma proposta inovadora para o desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural aplicado em Pórticos Metálicos com a tomada de decisões baseado na Computação Inteligente

Para o objetivo proposto utilizou-se o modelo *shear building* de um pórtico metálicos onde coletou-se a resposta dinâmica da estrutura em estado normal e estado de falha, em uma avaliação não destrutiva (NDE). Após a coleta implementou-se o Algoritmo de Seleção Negativa oriundo do SIA para a tomada de decisões e detecção de falhas estruturais.

Com isto, este trabalho busca não só implementar o SHM para garantir a segurança em pórticos metálicos, mas também otimizar seu funcionamento com tomada de decisões baseado no Sistema Imunológico Artificial por intermédio do Algoritmo de Seleção Negativa

2. SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL: ALGORITMO DE 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 por BRADLEY (2002), 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, 2003).

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 DASGUPTA (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.

Assim o ANS presenta a característica de detectar mudanças em estados de sistemas atuando no reconhecimento de padrões e na detecção de anomalias sendo o diferencial e revolucionário do SHM 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) (Ilhan,2018)

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

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

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

Conforme MORO (2019), 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:

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

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:

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

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.

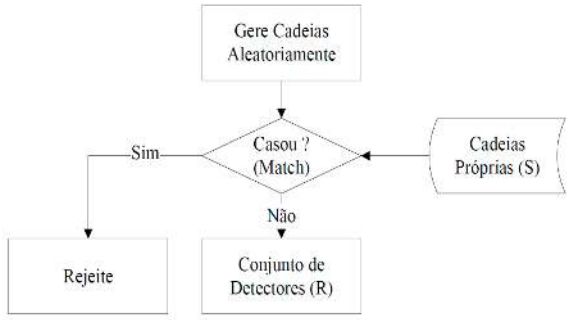
Assim, caso Af_T for maior ou igual ao TAf ocorre o casamento perfeito e as cadeias são consideradas semelhantes. Por outro lado, se a Af_T for menor que a TAf , o detector não reconhece a cadeia, e logo não ocorre o casamento entre os padrões.

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 1: Fluxograma Censoriamento

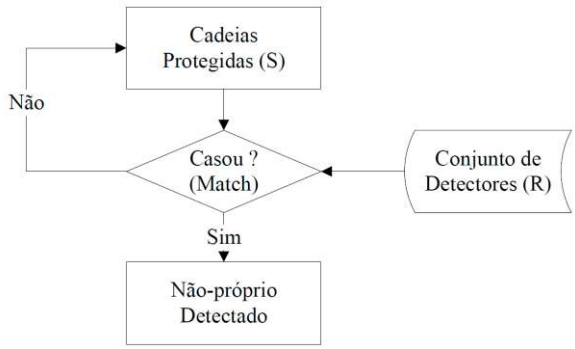


Fonte: Lima (2013)

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 2: Fluxograma Monitoramento



Fonte: Lima (2013)

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Conforme apresentado, o pórtico metálico é uma das bases estruturais que predominam na projeção de estruturas simples e complexas indo desde um posto a uma grandes pontes ou aranhas céus.

Sendo assim, a vulnerabilidade do material aos agentes solicitantes pode proporcionar acidentes catastróficos, resenha de perdas econômicas, e pior de morte de pessoas.

Observando isto, a metodologia deste trabalho tem por base a detecção deste dano estrutural buscando intervir na sua propagação e, portanto, proteger a economia e a sociedade.

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 e Sgard, 2015; Deraemaeker,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

3.1 Aparato experimental

Este artigo apresenta a proposta de uma metodologia baseada no modelo de shear building de um pórtico metálico representado na Figura 3.

Figura 3: Modelo Estrutural Pórtico Metálico



Fonte: elaborado pelo autor

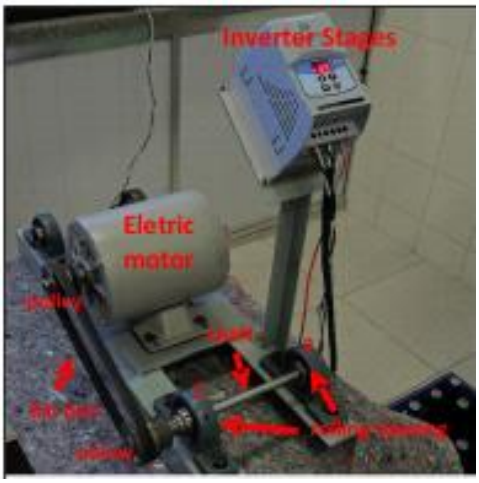
O Modelo de shear building caracteriza uma estrutura real em uma ótica reduzida e com algumas simplificações destacadas por Silvia como:

- Somente o deslocamento horizontal
- Rigidez infinitas das vigas e pilares
- 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 metálica constituída por uma armação de aço que representa Pórtico Metálico.

Associado a estrutura metálica, utilizou-se um motor de indução, representado pela Figura 4, sendo a fonte de excitação estrutural.

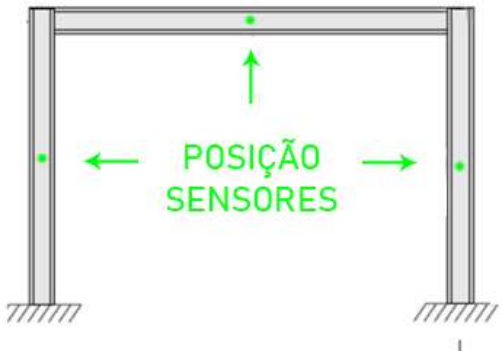
Figura 4: Motor de Indução



Fonte: elaborado pelo autor

Além deste aparato estrutural, utilizou-se para a coleta da dinâmica estrutural do Pórtico, acelerômetros MPU-6050 acoplados a estrutura nos pontos de maior momento fletor atuante, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5: Acelerômetros acoplados



Fonte: elaborado pelo autor

O modelo do Pórtico metálico associado ao motor de excitação, foram fixados em uma mesa inercial. Esta tem por objetivo garantir a estabilidade do experimento, reduzindo os ruídos experimentais.

3.2 Procedimento experimental

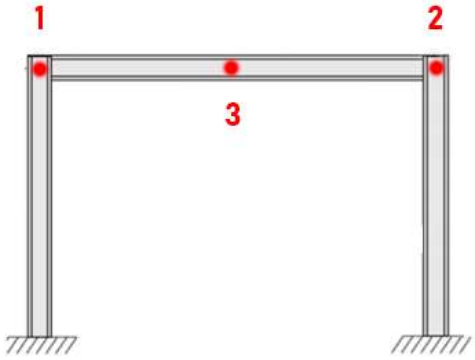
Para uma análise estabelecida em variadas amplitudes de excitação, optou-se por uma excitação realizada pelo motor de indução. Este motor possui frequência máxima de 60Hz, a qual foi variada, em cada etapa de coleta de dados, de 2 em 2 Hz

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 variável estabelecida do motor de excitação 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 representativos de falha da estrutura representam os modos de falhas possíveis que alteram os parâmetros espaciais. Por isso, buscando um ensaio não destrutivo, utilizou-se massas adicionais acopladas na estrutura, conforme representado na Figura 6.

Figura 6: Disposição das massas adicionadas



Fonte: elaborado pelo autor

Sendo assim, para este trabalho determinou-se 3 modos de falhas:

- Falha 1: acréscimo de massa no ponto 1;

- Falha 2; acréscimo de massa no ponto 2;
- Falha 3: acréscimo de massa no ponto 3.

Com relação aos sinais que representam uma estrutura normal, foi estabelecido pela coleta de dados da estrutura sem acréscimo de massa

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. RESULTADOS

O Sistema de Monitoramento de Integridade estrutural apresenta intima relação com os sensores utilizados e com o processamento de dados, sendo sua eficiência e viabilidade dependentes deles.

Por isso, a análise dos resultados está baseada na verificação da coleta de dados, estabelecido por acelerômetros inseridos no ramo estrutural, e na análise do processamento de dados, que neste trabalho está vinculado ao Algoritmo de Seleção Negativa.

4.1 Sensores: Acelerômetros MPU-6050

A eficiência de um sensor é relacionada a viabilidade estrutura, viabilidade econômica e viabilidade técnica.

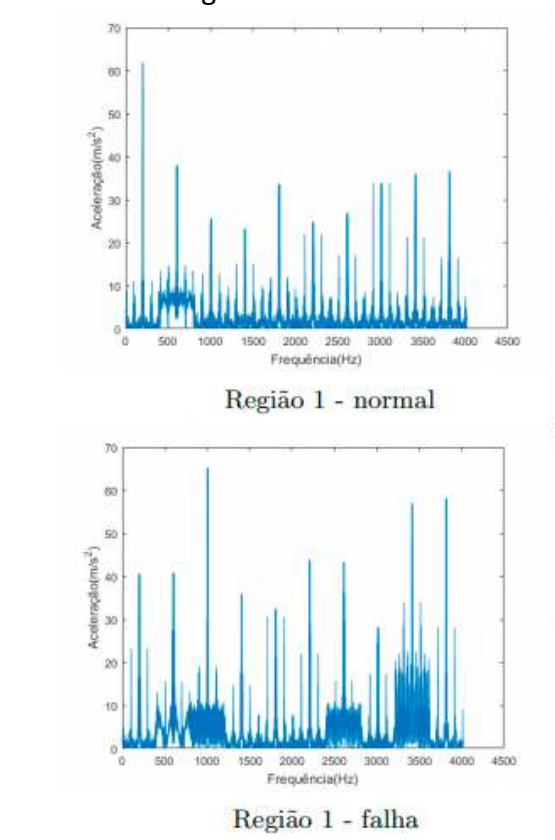
Analisando, com base no procedimento experimental, os Acelerômetros MPU-6050, denota-se que estes possibilitaram o sensoriamento global da estrutura com uso de seis sensores, apenas.

Isto demonstra que a escolha deste tipo de sensor apresentou uma alta viabilidade estrutural, atuando no sensoriamento global, e alta viabilidade econômica, visto que, houve o melhor custo benefício desses sensores.

Observando, os resultados obtidos graficamente, demonstrados na Figura 7 denota-se que houve também alta viabilidade técnica.

Conforme estabelecido na teoria estrutural, o acréscimo de massa na região 1 representaria um dano relacionado a ligação viga/pilar o que proporcionaria o aumento na dinâmica estrutural, representado corretamente na Figura 7 e comprovando a viabilidade técnica.

Figura 7: Excitação de 40htz com acréscimo de massa na região 1.



Fonte: elaborado pelo autor

4.2 Algoritmo de Seleção Negativa

Para verificar a eficiência do algoritmo de seleção negativa, recorreu-se a subdivisão do processamento dos sinais estruturais em duas situações: Processamento Sequenciado, Processamento Randômico Normal, Processamento Randômico de Falha

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.

4.1.1 Processo 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 120 sinais próprios e 120 sinais não próprios. Houve uma Taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.5595 segundos.

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 (MORO,2019)

4.1.1 Processamento Randômico Normal

No Processamento Randômico Normal, busca-se analisar a relação entre o conhecimento máximo do ANS, sendo neste caso 120 sinais normais, com a variação dos modos de falha.

Por isso a Tabela 1, apresenta para as iterações realizadas, o número de sinais com falha usados e a porcentagem de acerto médio para cada caso.

Tabela 1: Número de sinais com falha usados e a porcentagem de acerto médio

Sinais Falha	Afinidade	Taxa de acerto
120	100,00	100%
100	83,33	100%
80	66,67	100%
60	50,00	100%
40	33,33	100%
20	16,67	100%

Fonte: elaborado pelo autor

Observando a tabela, mantido o conhecimento máximo do ANS, houve um acerto de 100% que demonstra a independência ao número e ao modo das falhas presente na estrutura.

Além disso, o processamento teve um tempo médio de 0,6 segundo representando uma instantaneidade na detecção de falhas

4.1.1 Processamento Randômico Falha

No Processamento Randômico Falha, busca-se analisar a relação entre o máximo de falha, 120 sinais de falha, e a variação do conhecimento do algoritmo relacionado ao número de sinais normais utilizados

Por isso a Tabela 2, apresenta para as iterações realizadas, o número de sinais normais usados e a porcentagem de acerto médio para cada caso.

Tabela 2: Número de sinais normais usados e a porcentagem de acerto médio

Sinais Normais	Afinidade	Taxa de acerto
120	100,00	100%
100	83,33	100%
80	66,67	100%
60	50,00	100%
40	33,33	100%
20	16,67	98%

Fonte: elaborado pelo autor

Através da tabela 2, fica nítido a capacidade de otimização do ANS, que mesmo tendo um número ínfimo de sinais normais para compor sua aprendizagem, houve um acerto médio de 98% e um tempo de processamento inferior a 0,5 segundo.

Além disso percebe-se que independentemente do número, modo e intensidade de falha, o Algoritmo de Seleção Negativa, tendo um aprendizado ótimo apresentará 100% de acerto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da vulnerabilidade dos Pórticos metálicos, este trabalho baseado nas inovações tecnológicas buscou não só implementar um Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural para garantir a segurança em pórticos metálicos, mas também otimizar seu funcionamento com tomada de decisões baseado no Sistema

Imunológico Artificial por intermédio do Algoritmo de Seleção Negativa.

Observando os resultados, é notório o sucesso deste SHM que apresentou viabilidade no processo e sensoriamento, e eficiência máxima no processamento de dados.

Isto é demonstrado pelos resultados obtidos, afinal mesmo tendo um baixo aprendizado por parte do ANS, o SHM proposto apresentou uma acurácia e precisão com 98% de acerto, associado a um tempo de processamento inferior a um segundo

Assim, 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 superando as vulnerabilidades do Pórtico Metálico.

AGRADECIMENTOS

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 Sisplexos, o laboratório onde trabalho e onde tenho uma segunda família

REFERÊNCIAS

Abreu, C. C. E., Chavarette, F. R., Alvarado, F. V., Duarte, M. A. Q., Lima, F. P. A., 2014, **Dual-Tree Complex Wavelet Transform Applied to Fault Monitoring and Identification in Aeronautical Structures**, International Journal of Pure and Applied Mathematics 97, 89-97. DOI: 10.12732/ijpam. v97i1.9 https://doi.org/10.12732/ijpam.v97i1.9

Atalla, Noureddine e Sgard, Franck. **Finite element and boundary methods in structural acoustics and vibration**. CRC Press, 2015. https://doi.org/10.1201/b18366

Bradley, D.W. and Tyrrell, A.M. (2002), "**Immunotronics – novel finite-state-machine architectures with built-in self-test using self-nonself differentiation**", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6 No. 3, pp. 227-238. https://doi.org/10.1109/TEVC.2002.1011538

Chen, Y. and Li, Y. (2018), **Computational Intelligence Assisted Design in Industrial Revolution 4.0**, CRC Press, Boca Raton, p. 527. https://doi.org/10.1201/9781315153179

Dasgupta, D. and Niño, L.F. (2009), **Immunological Computation: Theory and Applications**, Taylor and Francis Group, Boca Raton, p. 298. https://doi.org/10.1201/9781420065466

De Castro, L.N. and Timmis, J. (2003), "**Artificial immune systems as a novel soft computing paradigm**", Soft Computing Journal, Vol. 7 No. 8, pp. 526-544. https://doi.org/10.1007/s00500-002-0237-z

Deraemaeker, A. and Worden, K. (2010), **New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring**, SpringerWien, NewYork, p. 311. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0399-9

Dhapekar, N. K.; Chopkar, D. M. **Structural health monitoring of ordinary portland cement concrete structures using X-ray diffraction**. International Journal of Applied Engineering Research, v. 11, n. 9, p. 6128-6131, 2016.

Farrar, C.R. and Worden, K. (2013), **Structural Health Monitoring: A Machine Learning**

Perspective, John Wiley, Chichester, p. 643. EC. https://doi.org/10.1002/9781118443118

Forrest, S., Perelson, A.S., Allen, L. and Cherukuri, R. (1994), "**Self-nonself discrimination in a computer**", Proceeding of the IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, Oakland, pp. 202-212. https://doi.org/10.1109/RISP.1994.296580

Gopalakrishnan, S., Ruzzene, M. and Hanagud, S. (2011), **Computational Techniques for Structural Health Monitoring**, Springer-Verlag, London, p. 517. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-284-1

Ilhan, A., Mehmet, K., Ebru, K. and Erhan, A. (2018), "**A new fault diagnosis approach for induction motor using negative selection algorithm and its real-time implementation on FPGA**", Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol. 34 No. 1, pp. 689-701. https://doi.org/10.3233/JIFS-161964

Lima, F.P.A., Chavarette, F.R., Souza, A.S.E., Souza, S.S.F. and Opes, M.L.M. (2013), "**Artificial imune systems with negative selection applied to health monitoring of aeronautical structures**", Advanced Materials Research, Vol. 871, pp. 283-289. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.871.283

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

Moro, T. C., Chavarette, F. R., Roéfero, L. G. P., & Outa, R. (2019, November). **Detection of Structural Failure of a Two Floor Building Using an Artificial Immunological System**. In Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332 (Vol. 11, No. 4, pp. 73-84). https://doi.org/10.5747/ce.2019.v11.n4.e298

Popkova, E.G., Ragulina, Y.V. and Bogoviz, A.V. (2019), **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century,** Springer International, p. 249. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7

Snedecor, G. W., Cochram, W. G., 1989, **Statistical Methods**, 8rd ed. Iowa: Iowa State University Press.