http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2021.v13.n2.e361
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 11/08/2021 Revisado: 31/08/2021 Aceito:08/09/2021

MONITORAMENTO DE FALHAS EM SISTEMAS DINÂMICOS UTILIZANDO UM MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS BASEADO NO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

Monitoring Failures in Dynamic Systems Using a Data Analysis Method Based on the Negative Selection Algorithm

Driely Candido Santos, Mara Lúcia Martins Lopes, Fábio Roberto Chavarette, Bruno Ferreira Rossanês

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP.
E-mail: driely.candido@unesp.br

RESUMO – Este trabalho apresenta a aplicação de um método de monitoramento e diagnóstico de falhas em estruturas mecânicas que se baseia na teoria de sinais de vibrações e nos Sistemas Imunológicos Artificiais para auxiliar no processamento de dados. Utiliza-se do Algoritmo de Seleção Negativa como ferramenta para identificação de amostras de falhas extraídas dos sinais simulados em laboratório de um rotor dinâmico. Esta metodologia pode auxiliar profissionais de manutenção de estruturas mecânicas, facilitando a tomada de decisões. O conjunto de dados empregado no processamento do sistema inteligente foi gerado por meio de experimentos. Para as condições normais (*base-line*) utilizaram- se os sinais do rotor em funcionamento livre, ou seja, sem acréscimo de massa desbalanceadora e para as condições de falha foram adicionadas massas desbalanceadoras ao sistema. Os resultados são satisfatórios, apresentando precisão e robustez.
Palavras-chave: Algoritmo de Seleção Negativa, Rotor de Jeffcott, Monitoramento de Integridade Estrutural, Estruturas Mecânicas, Maquinas Rotativas.

ABSTRACT – This work presents the application of a method for monitoring and diagnosing failures in mechanical structures based on the theory of vibration signals and on Artificial Immune Systems to assist in data processing. It uses the Negative Selection Algorithm as a tool to identify fault samples extracted from the laboratory simulated signals of a dynamic rotor. This methodology can help mechanical structure maintenance professionals, facilitating decision-making. The data set used in the processing of the intelligent system was generated through experiments. For normal (base-line) conditions, the signals of the rotor in free operation were used, that is, without the addition of unbalance mass, and for the fault conditions, unbalance masses were added to the system. The results are satisfactory, showing precision and robustness.
Keywords: Negative Selection Algorithm, Jeffcott Rotor, Structural Integrity Monitoring, Mechanical Structures, Rotating Machines.

1. INTRODUÇÃO

Maquinas rotativas (Rotores) seguem em evolução desde a invenção da roda, assim como a humanidade, sejam em aplicações como nos automóveis, ventiladores, maquinas de lavar, ou na indústria em complexas bombas centrifugas, turbinas eólicas, compressores, eixos de transmissão, etc.

Equipamentos de grandes dimensões como redutores, turbinas, geradores, estão sujeitos a vibrações excessivas que podem ser transmitidas ao piso de fabrica, trabalhadores e máquinas vizinhas e ainda podem gerar ruídos acentuados, o que pode afetar a saúde e conforto das pessoas, além de antecipar o desgaste de componentes. A longo prazo pode ocasionar falhas como desbalanceamento e desalinhamento de eixos, folga nos mancais e implicar no mal funcionamento do maquinário (SOTELO JUNIOR, 2006).

O cenário da indústria e serviços atuais exige máxima eficiência de processos, produtos e estruturas, isto inclui menor custo de produção, maior agilidade do processo, maior qualidade, confiabilidade e segurança, tanto para a produção quanto para o produto final. Acompanhando este processo a indústria como um todo tem investido no aperfeiçoamento de tecnologias que proporcionem boa parte destes predicados, de forma rápida e eficiente. O monitoramento de integridade de estruturas (*Structural Health Monitoring* - *SHM*) é uma tendência ao que se refere a técnicas direcionadas a manutenção preditiva e detecção de falhas (BALAGEAS; FRITZEN; GUEMES, 2006).

A expansão da chamada indústria 4.0 e da sociedade tem expressado a necessidade de inovações tecnológicas para monitoramento de estruturas em tempo real, técnicas que possuam a capacidade de antecipar falhas, que apresente respostas rápidas de modo a possibilitar tomadas de decisões eficazes. O emprego de soluções embasadas em processos naturais como Redes Neurais Artificias, Lógica fuzzy, Sistemas Imunológicos Artificiais e etc., tem aperfeiçoado processamento de dados o que otimiza os sistemas de monitoramento de estruturas (SANTOS; LOPES, 2020).

Embora as técnicas que utilizam os Sistemas Imunológicos Artificiais sejam relativamente novas, o emprego destes algoritmos em análise de dados, reconhecimento de padrões, segurança computacional, etc., tem sido pesquisado em diversas áreas, conforme as características do problema (DE CASTRO; TIMMIS, 2002).

Neste artigo propõe-se o uso do Algoritmo de Seleção Negativa num Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural, a partir de dados de um rotor acoplado a um motor elétrico, a fim de verificar o desempenho do Algoritmo proposto por Forrest *et al*. (1994), como ferramenta aplicada à diferenciação de sinais produzidos em laboratório a partir do acréscimo de massa desbalanceadora no disco fixado ao rotor. O uso deste algoritmo é justificado por sua capacidade de reconhecimento de padrões e por apresentar eficiência em outros trabalhos que exigiram estas mesmas características (LIMA *et al*., 2013).

As demais seções deste trabalho estão organizadas da seguinte maneira: Na seção 2 é apresentada uma revisão sobre sistemas dinâmicos, balanceamento e desbalanceamento de rotores; Na seção 3 é introduzido o Monitoramento da Integridade de Estruturas *(Structural Health Monitoring — SHM);* Na seção 4 é apresentada uma revisão do Algoritmo de seleção Negativa proposto por Forrest *et al.* (1994); Na seção 5 é apresentada a metodologia proposta no trabalho e a descrição do experimento realizado para coleta de dados; Na seção 6 são apresentados os resultados obtidos; Por fim na seção 7 são apresentadas algumas conclusões e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. SISTEMAS DINÂMICOS

Da perspectiva da física um sistema pode ser compreendido como uma coleção de elementos interligados que apresentem relações de causa e efeito, de modo a atender determinado objetivo. Dividido em dois estados, este sistema pode ser estático onde suas propriedades descritivas não variam com o tempo ou em sistemas dinâmicos quando estas propriedades variam com o tempo. O espaço pode variar em ambos os casos (OUTA, 2017).

2.1. Vibrações Mecânicas

Segundo Rao (2009), vibração ou oscilação é definida por qualquer movimento repetido após um intervalo de tempo. O estudo das vibrações aborda movimentos oscilatórios e as forças associadas a corpos.

Um sistema vibratório é considerado um sistema dinâmico, pois suas variáveis como as excitações e respostas são inerentes a variação

do tempo. De modo geral, um sistema vibratório engloba a transferência e armazenamento de energia, seja ela de energia potencial (mola ou elasticidade) para energia cinética (massa ou inércia) e vice-versa (RAO, 2009).

2.2. Desbalanceamento

O desbalanceamento é um evento identificado pela presença de desequilíbrio de massa relacionadas ao eixo de rotação. Segundo Garcia (2005), os rotores apresentam desbalanceamento residual, decorrente das tolerâncias das máquinas de usinagem, processos de fabricação ou até devido a montagem. Um rotor desbalanceado além de causar vibrações, pode causar o encurtamento do ciclo de operação do equipamento e causar danos.

O balanceamento pode ser caracterizado, a partir do acréscimo ou remoção de massa, de maneira que anule o efeito de desbalanceamento. Desta forma é possível garantir o funcionamento adequado do equipamento (GARCIA, 2005).

2.3. Rotores Dinâmicos

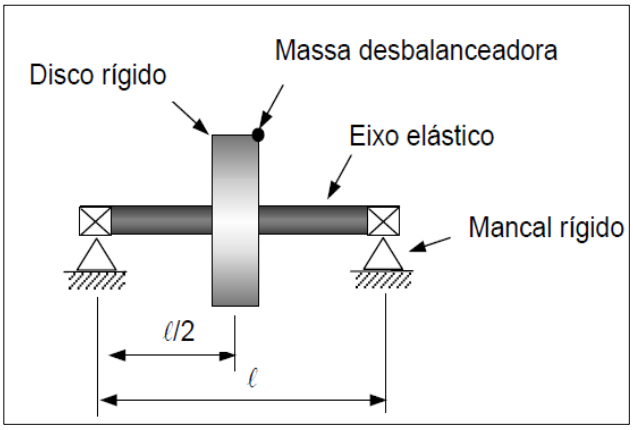
De acordo com Peres (2016), os rotores são quase que exclusivamente constituídos por mancais, eixo e disco, os sistemas rotativos desempenham dois movimentos rotativos superpostos:

- Rotação em torno de si próprio.
- Rotação do eixo defletido em torno de sua configuração não defletida (precessão).

Os movimentos de precessão podem ser sincronizados, quando a trajetória que o centro geométrico desempenha acompanha o sentido de rotação própria do rotor, ou não sincronizado, neste caso a trajetória que o centro geométrico do rotor realiza está no sentido oposto a rotação própria do rotor; no geral precessões síncronas são causadas por desbalanceamento no rotor (PERES, 2016).

Segundo Outa (2017), a teoria de vibração para sistemas de rotores dinâmicos é conhecida como *Jeffcott rotors.* O rotor de Jeffcott ou rotor de Laval é caracterizado por um eixo flexível e um disco central apoiado por mancais análogos como exemplificado na Figura 1. Refere-se a um modelo desenvolvido para evidenciar o aparecimento de velocidades críticas em rotores, compreender como a amplitude se torna máxima na velocidade crítica e como se movimenta a massa desbalanceadora internamente a órbita do rotor (OUTA, 2017).

Figura 1. Modelo rotor de Jeffcott.



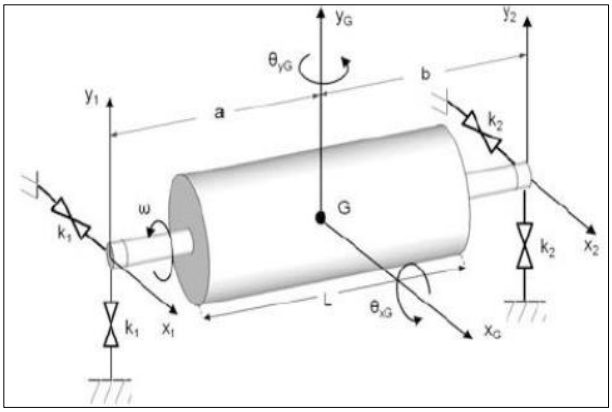
Fonte: (Peres, 2016).

No rotor de Jeffcott a vibração é dependente do movimento e a força excitadora é interna, o que em algumas situações podem tornar o eixo instável e isso pode aumentar de maneira contínua a amplitude do deslocamento em relação ao tempo (OUTA, 2017).

2.4. Efeito Giroscópio

Segundo Outa *et al.* (2015), o desalinhamento do eixo, relativo a seus componentes de apoio ocorre por causa do efeito giroscópio. As consequências do efeito giroscópio se dão pela rotação do eixo em torno do eixo x e y e no centro da massa do disco como mostrado na Figura 2, onde as constantes de rigidez são representadas por $K1$,$K2$, e, a e b, e caracterizam a distancia entre o centro eixo de massa G e o fim do eixo onde L representa a distancia absoluta entre os rolamentos (OUTA, 2017).

Figura 2. Eixo sob efeito giroscópico.



Fonte:(Outa, 2017).

São formados os ângulos θyG e θxG em decorrência das forças giroscópicas no disco com centro de massa G. O eixo tem influência de duas forças giroscópicas, a primeira é a inércia giroscópica, que atua diretamente na rigidez do rotor (disco) a partir do princípio da inércia, o que resulta na modificação do eixo de rotação relativo a sua referência. A segunda é a precessão, que é desencadeada quando a velocidade angular em torno do próprio eixo altera sua orientação o forçando a movimentar-se sempre em ângulo reto (OUTA, 2017).

3. SHM

Inserido nos contextos atuais de manutenção preditiva e projeto de maquinas, o Monitoramento da Integridade de Estruturas *(Structural Health Monitoring — SHM)* tem como finalidade identificar falhas em fases iniciais, baseado na variação das propriedades de determinada estrutura (BALAGEAS; FRITZEN; GUEMES, 2006).

Segundo Worden e Dulieu-Barton (2004), o SHM pode ser caracterizado como um método para resolução de problemas de reconhecimento de padrões. E pode ser elaborado em algumas etapas:

1. *Investigação Operacional*- Nesta etapa são questionadas as justificativas econômicas, ou seja, os custos e condições relevantes para a operação.
2. *Aquisição da Informação*- aqui são definidos os tipos de sensores necessários para obtenção dos sinais, o tipo de processamento e o armazenamento que serão utilizados;
3. *Triagem*-, as características apresentadas pela estrutura que demonstrem propriedades de falhas e característica que não apresentem falhas, são extraídas;
4. *Processamento e análise*- Realiza-se o processamento dos dados, a partir de algoritmos que permitam apontar a real situação da estrutura.

De acordo com worden e Dulieu-Barton (2004), um sistema de monitoramento eficiente deve acumular informações sobre o dano de maneira a permitir que, ações corretivas sejam tomadas para restaurar a estrutura ou sistema de operação. E que garanta confiabilidade e segurança ao sistema, além de assegurar que o monitor receba apenas as informações necessárias para tomada de decisão.

Segundo Rytter (1993), o acúmulo de danos leva a falhas, que não permitem a estrutura atuar de maneira satisfatória, deste modo estabelece - se quatro níveis para avaliação de danos (FARRAR; WORDEN, 2007):

- Detecção: qualifica que tipo de dano é apresentado na estrutura;
- Localização: Informações sobre a possível posição do dano;
- Avaliação: estima-se a extensão do dano;
- Predição: estimativa da vida útil da estrutura, informações sobre a segurança da estrutura.

O bom desempenho de um SHM garante segurança e confiabilidade a estrutura, além disto, assegura maior vida útil aos componentes, menor custo com manutenção. O uso do SHM permite a execução ideal da estrutura, possibilita substituir a manutenção programada pela baseada no desempenho, o que reduz o tempo de parada e erros humanos (BALAGEAS; FRITZEN; GUEMES, 2006).

Na literatura é possível encontrar diversas pesquisas que apresentam bons resultados e precisão, utilizando sistemas inteligentes para no monitoramento de falhas.

Chandrashekhar e Ganguli (2009) apresentam um sistema fuzzy para detecção de falhas estruturais usando curvaturas das formas modais de vibração.

Xiang-Jun, Zhan-Feng e Qiang (2010) propõe um modelo para avaliar a integridade de estruturas de pontes através dos sinais de vibração utilizando transformada Wavelet.

Oliveira, Chavarette e Outa (2020) apresentam uma metodologia para diagnóstico de configurações de danos apresentados a um rotor, que utiliza os algoritmos de Seleção Negativa e Seleção Clonal.

4. ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

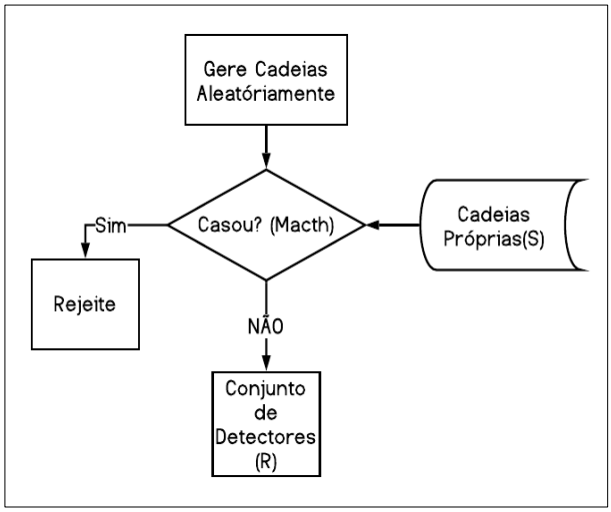
Proposto por Forrest et al. (1994), o Algoritmo de Seleção Negativa (*ASN*) foi desenvolvido inicialmente para a detecção de anomalias em sistemas computacionais. Inspirado no processo de seleção negativa dos linfócitos tipo T que ocorre no timo, o algoritmo possui a capacidade de reconhecimento de padrões (FORREST *et al*., 1994).

Análogo ao sistema de defesa biológico, um conjunto de cadeias próprias (S) é definido, assim é realizada a fase de censoriamento, depois cadeias aleatórias são geradas e avalia-se a afinidade (*match*) entre as cadeias próprias (S) e

as geradas aleatoriamente, para o caso da afinidade ser superior ao valor pré-definido a cadeia é rejeitada caso contrario é armazenada num conjunto (R) de detectores. Enfim dado o conjunto de cadeias que se deseja proteger, a afinidade entre cada uma delas e o conjunto de detectores é validada. Se a afinidade for superior ao valor pré-estabelecido, então um elemento não próprio é identificado.

A seguir nas Figuras 3 e 4 estão as representações dos fluxogramas do censoriamento e monitoramento respectivamente (CASTRO, 2001; LIMA *et al.*, 2013).

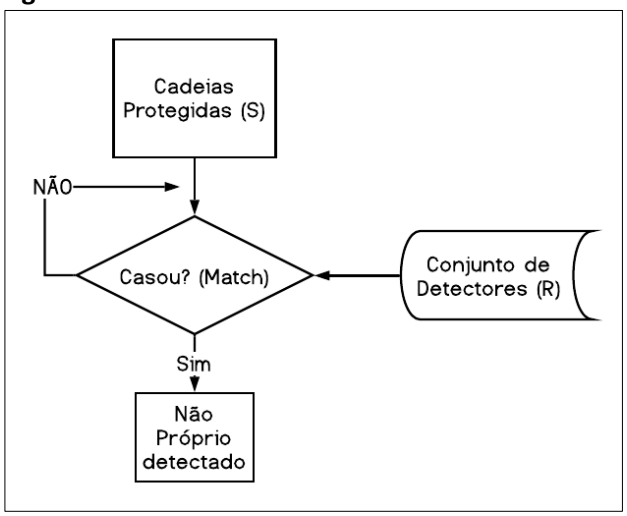
Figura 3. Fase censoriamento.



Fonte :(Castro, 2001).

.

Figura 4. Fase Monitoramento.



Fonte :(Castro, 2001).

A afinidade entre as cadeias é definida a partir do critério conhecido como casamento ou combinação, de modo que o casamento pode ser classificado como perfeito ou parcial (LIMA *et al*., 2015). Para este trabalho foi adotado o casamento parcial, de maneira que uma quantidade de pontos entres os padrões deve possuir o mesmo valor para que haja a confirmação do casamento. Tal quantidade é denominada taxa de afinidade, deve ser previamente definida. A taxa de afinidade define o grau de semelhança mínimo para que se determine o casamento entre as cadeias em análise (BRADLEY; TYRRELL, 2002).

A taxa de afinidade é calculada a partir da Equação 1 (BRADLEY; TYRRELL, 2002) :

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

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).

Para quantificar a afinidade total entre os padrões, utiliza-se a Equação 2.

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

Sendo:

Af_T : relação percentual de afinidade entre os padrões analisados;

L: quantidade total de variáveis;

Vc: variáveis casadas;

$\sum_{i=1}^{L} Vc$: somatória (quantidade) de variáveis casadas.

Para que o casamento entre os dois padrões seja estabelecido Af_T deve ser maior ou igual a TAf, desta maneira consideram-se semelhantes.

5. METODOLOGIA

5.1. Experimentos

As especificações dos equipamentos utilizados são:

- 1 Motor elétrico KOHLBACH de indução trifásico tipo gaiola de 220V, 0,5cv frequência nominal de 60 Hz, com inversor de frequência Weg CFW-10 Clean podendo variar de 0 a 60 Hz;
- Eixo de aço 1045, diâmetro de 12 mm, distância entre eixos 128 mm;
- Dois mancais de rolamento P205 UC20;
- 01 acelerômetro MPU6050;
- 01 placa de microcontrolador Arduíno UNO;

- 01 computador Intel Core i5 8th Gen, 8GB de memória RAM, sistema operacional Windows 10, 64 bits, com os softwares GNU Octave® e Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) instalados;
- 01 disco raiado com furos e três massas cilíndricas de 50g cada uma.

Foram coletados os sinais em estado normal, ou seja, quando o rotor funciona livremente sem o acréscimo das massas. Utilizaram-se três massas de aproximadamente 50 gramas cada uma, para simular o desbalanceamento do rotor, estas foram acopladas a um disco de fixação junto ao eixo uma a uma. Os sinais foram coletados a uma variação de frequência de 4 a 16Hz de duas em duas, para cada frequência foram coletados 10 sinais. As frequências foram definidas a partir de testes, nos quais se atentou à inércia rotacional e à trepidação (devido à vibrações excessivas) da máquina. Durante o experimento notou-se que acima de 16Hz o sistema entra em ressonância, dessa maneira os sinais foram coletados até a frequência de 16Hz para cada configuração de falha. Desta maneira foi definida a faixa de frequência de 4Hz a 16Hz que possibilitou a maquina operar sem ocorrências de trepidação.

Dessa forma coletou-se 70 sinais para cada massa adicionada e 70 sinais para configuração de normalidade, quando não havia nenhuma massa acoplada ao disco. Na Figura 5 estão dispostas as três massas utilizadas para simular o desbalanceamento do rotor neste experimento.

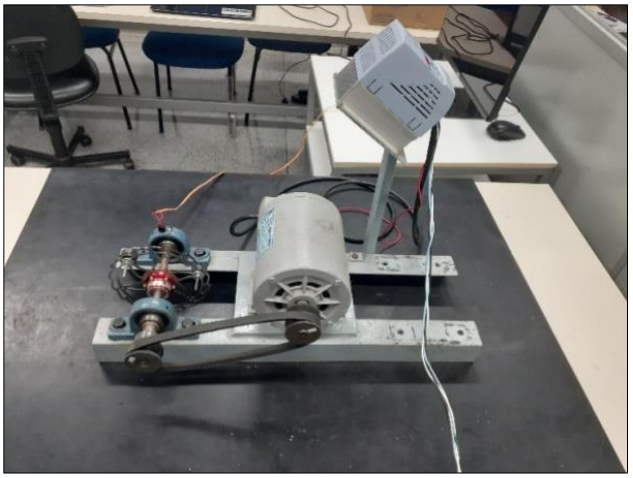
Figura 5. Massas desbalanceadoras.



Fonte: Autoria própria

A Figura 6 mostra como foi montado o modelo experimental, elaborado a partir de um motor elétrico trifásico do tipo gaiola, ligado por meio de duas polias e uma correia a um eixo com disco centralizado e apoiado a dois mancais (rolamentos), junto ao sistema tem-se o inversor de frequências caracterizando o rotor.

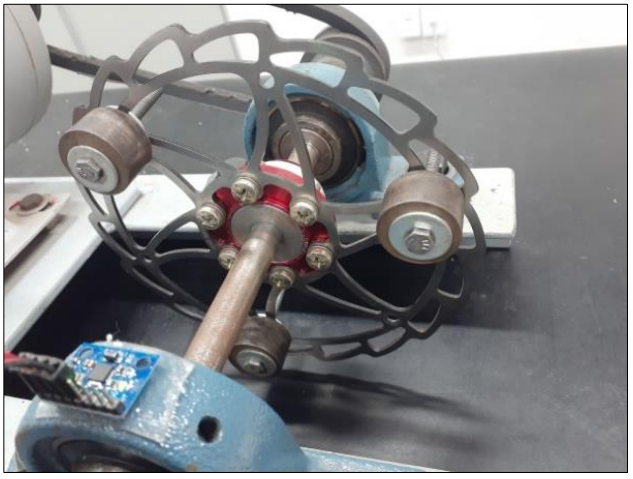
Figura 6. Experimento montado.



Fonte: Autoria própria.

O acelerômetro foi fixado num dos mancais de apoio com auxilio de fitas dupla face como apresentado na Figura 7. Através de cabos o acelerômetro é conectado ao microcontrolador Arduíno, que por sua vez, está conectado ao computador, via porta USB para estabelecer a comunicação serial e a energia a placa. As frequências foram ajustadas através do inversor de frequências acoplado ao motor a cada medição.

Figura 7 Configuração do rotor.



Fonte: Autoria própria.

5.1.1 Transmissão e Processamento dos Sinais

Os softwares GNU Octave® e Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) são executados para permitir a comunicação serial entre o sensor com o microcontrolador e do

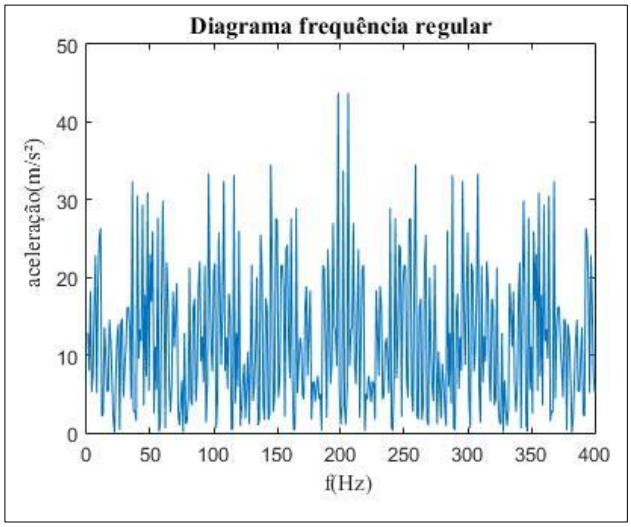
microcontrolador com computador, possibilitando a captação dos sinais.

O sensor capta os sinais e imprime os valores de aceleração relativos aos eixos coordenados X,Y,Z; em formato de texto. O software GNU Octave® executa o programa que realiza a leitura dos dados, os converte para o formato *float* e armazena-os em vetores conforme à referência. Assim, o resultado da aquisição são três vetores: um preenchidos com os valores da aceleração em X, outro da aceleração em Y e o último com as acelerações em Z.

Logo após, os dados captados são processados, assim é criado um único vetor para a norma dos valores de aceleração, em seguida a FFT (Transformada Rápida de Fourier) é aplicada para extrair o valor absoluto, onde se obtém sua magnitude. Os vetores criados são salvos em arquivos distintos separados por suas configurações. Após coletados todos os sinais das 4 configurações são organizados em duas matrizes de dados, formando o banco de dados SN com 70 sinais de características normais (*baseline*) e SF com 210 sinais característicos de falhas sinais da máquina, sinais estes que compõe o banco de dados aplicados ao Algoritmo de Seleção Negativa para a análise dos resultados desta proposta de monitoramento de falhas.

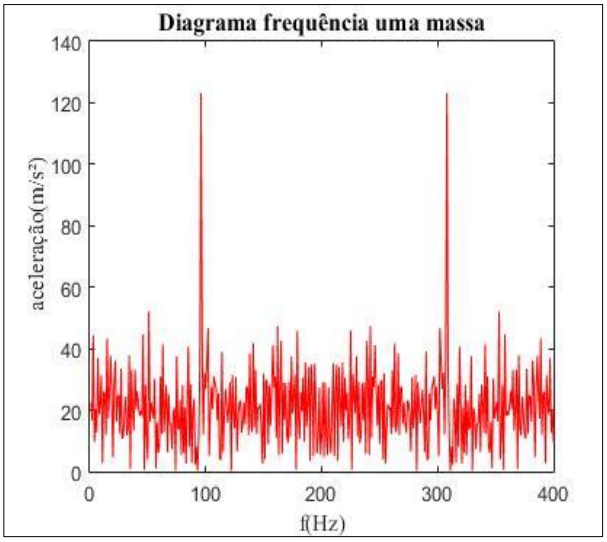
Nas Figuras 8 e 9 estão representadas as características dos sinais normais e dos sinais que apresentam falhas respectivamente, no qual é possível observar a variação no comportamento dos sinais, relativos a aceleração e frequência.

Figura 8. Gráfico representativo de um sinal emitido pela estrutura em seu estado normal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9. Gráfico representativo do sinal em condições de falha**.**



Fonte: Autoria própria.

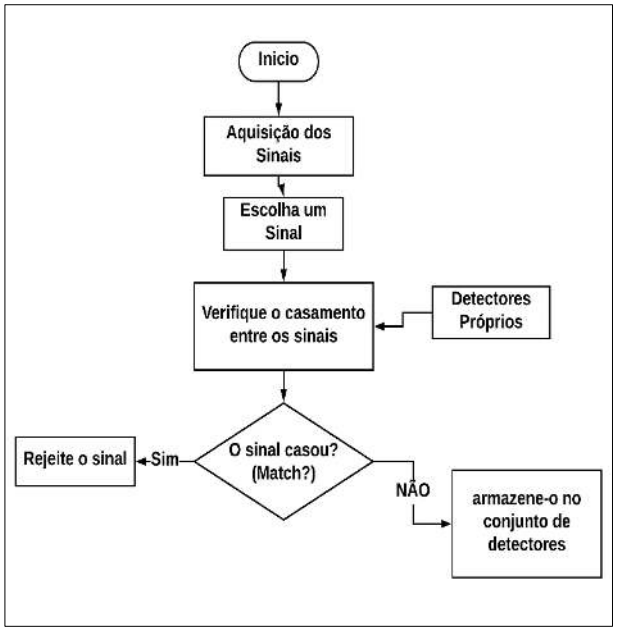
5.2 Metodologia proposta

O Presente trabalho propõe evidenciar a eficiência do ASN, aplicado ao monitoramento e detecção de falhas em uma estrutura mecânica rotativa (Rotor), a fim de identificar falhas a partir dos sinais obtidos em laboratório como descrito anteriormente. O método divide-se nas fases de censoriamento e de monitoramento:

5.2.1 Censoriamento

Esta fase é a responsável pela extração das características normais da estrutura e por armazená-las numa memória para a realização das detecções. Geram-se os detectores próprios (*base-line*) (Sinais que se deve proteger), sinais de vibração que apresentam a normalidade da estrutura, ou seja, não apresentam características de falhas. As cadeias (sinais) estão armazenados em formato de vetores, onde os valores discretizados são ordenados na posição de cada vetor. Os sinais são comparados ponto a ponto. Se houver casamento entre a cadeia gerada e um detector próprio este será rejeitado, caso contrário será aceito como um detector e armazenado num conjunto de detectores de falhas. Ocorre a repetição desta sequencia até que se atinja a quantidade de detectores (SANTOS *et al.*, 2021). O fluxograma do módulo censoriamento é apresentado na Figura 10 (LIMA *et al*., 2013):

Figura 10. Módulo Censoriamento do ASN.



Fonte: (Adaptado de Lima *et al.*, 2015).

5.2.2 Monitoramento

Na fase de monitoramento calcula-se a taxa de afinidade, que neste trabalho utiliza-se do critério proposto por Bradley and Tyrrel (2002). Afim de dinamizar e otimizar o processo, é sugerido a implementação de um desvio vinculado ao padrão detector (anticorpo) de maneira a adicionar uma tolerância ao critério de combinação entre os padrões na avaliação da afinidade (LIMA et al., 2015). A partir da Equação 3 o desvio é empregado a cada posição *i* do vetor, desse modo o casamento é avaliado ponto a ponto (SANTOS et al., 2021).

$$\underline{Ab_i} \leq Ag_i \leq \overline{Ab_i} \qquad (3)$$

Sendo:

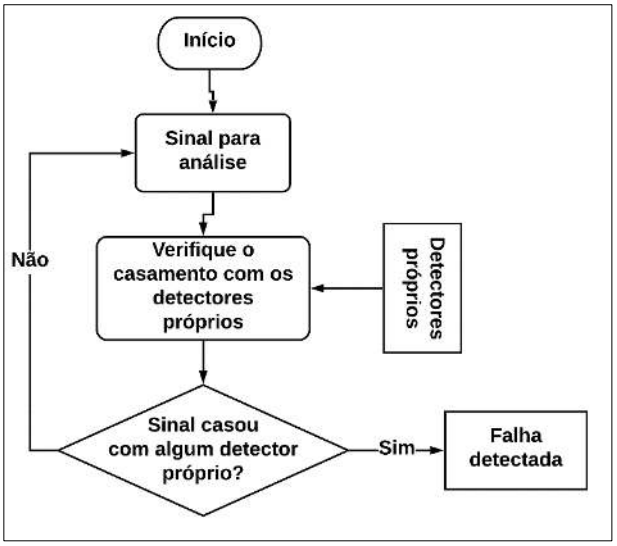
$\underline{Ab_i}$: Valor nominal da posição *i* menos o desvio adotado no anticorpo (padrão detector);

Ag_i: Valor nominal da posição *i* do antígeno (padrão em análise);

$\overline{Ab_i}$: Valor nominal da posição *i* mais o desvio adotado no anticorpo (padrão detector).

Para este trabalho emprega-se o desvio de 3% para os detectores. Geram-se os vetores para análise e verifica-se a afinidade entre estes e o conjunto de detectores próprios, desta forma caso ocorra o casamento entre eles uma falha foi detectada. A Figura 11 ilustra o fluxograma do módulo de monitoramento (SANTOS et al., 2021).

Figura 11. Módulo Monitoramento do ASN.



Fonte:(Adaptado de Lima *et al.*, 2015).

6. RESULTADOS

Todas as simulações foram realizadas em linguagem MATLAB, utilizando um PC Intel Core i5 8th Gen., 8GB de memória RAM, sistema operacional Windows 10, 64 bits. O algoritmo proposto foi aplicado aos dados experimentais realizados em parceria com Laboratório de Sistemas Complexos-SISPLEXOS.

Com objetivo validar o *ASN*, foram feitos testes de processamento, onde se alterou a quantidade de sinais em cada teste, afim de avaliar o comportamento do sistema com relação a quantidade de dados disponibilizados, tanto nas características de referência, quando o rotor trabalha em condições de normalidade, quanto nas informações de falhas. A finalidade é verificar a eficiência, precisão, a taxa de afinidade entre os detectores e o tempo de processamento em diferentes situações, recordando que são considerados a taxa de afinidade mínima de 70% e desvio de 3% para este trabalho. Os resultados e quantidade de sinais manipulados em cada teste estão apresentados na Tabela 1 a diante.

Tabela 1. Resultados obtidos.

Sinais Normais	Sinais Falha	Taxa de Afinidade	Acerto em (%)	Tempo de processamento (s)
70	21	76,9	100,00	4,44
70	63	70,00	100,00	7,61
70	210	70,00	100,00	3,6
65	21	75,00	100,00	2,99
35	105	70,00	100,00	3,01
35	210	70,00	100,00	9,49
07	21	70,00	100,00	3,8

Fonte: Autoria própria.

A fim de certificar a precisão dos resultados, os testes foram executados 25 vezes para cada configuração. Foi possível observar que o algoritmo de Seleção Negativa apresenta satisfatório índice de acerto, igual a 100%.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi desenvolvido com base na análise de dados extraídos a partir do comportamento de um sistema vibratório auto-exitado, caracterizado pela operação de um rotor dinâmico em desbalanceamento induzido. A proposta foi gerar um banco de dados, por meio de simulação em laboratório e aplica-lo a um método de monitoramento de integridade de estruturas, baseado nos sistemas imunológicos artificiais que utiliza como instrumento de processamento o algoritmo de seleção negativa. O critério proposto apresentou bons resultados, obtendo um índice de acerto de 100% em todos os testes, apresentando um bom tempo de processamento, sendo executado rapidamente (menos de 100 milésimos de segundo).

Sendo assim, é possível concluir, que proposta do trabalho foi atingida, o ASN foi capaz de detectar 100% dos sinais não-próprios dentre os analisados, isto demonstra a eficiência do algoritmo no reconhecimento de padrões, destaca aplicabilidade do meio empregado na reprodução do banco de dados, de maneira a caracterizar a estrutura monitorada.

Como sugestão para trabalhos incluem-se:

- O aperfeiçoamento do método, de maneira que o algoritmo seja capaz de classificar as falhas detectadas.
- A possibilidade que o método, apresente a localização da falha e exponha o nível do comprometimento da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio financeiro da Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.-P.; GUEMES, A. Introduction to Structural health Monitoring. *In*: **Structural health Monitoring**. 1. ed. London: [s.n.], 2006.. p. 13–43. https://doi.org/10.1002/9780470612071.ch1

BRADLEY, D. W.; TYRRELL, A. M. Immunotronics - Novel finite-state-machine architectures with built-in self-test using self-nonself differentiation. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 3, p. 227–238, 2002. https://doi.org/10.1109/TEVC.2002.1011538

CASTRO, L. N. DE. **Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais**. . 2001. 286 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas., 2001.

CHANDRASHEKHAR, M.; GANGULI, R. Structural Damage Detection Using Modal Curvature and Fuzzy Logic. **Structural Health Monitoring**, v. 8, n. 4, p. 267–282, jul. 2009. https://doi.org/10.1177/1475921708102088

DE CASTRO, L. N.; TIMMIS, J. Artificial Immune Systems : A Novel Approach to Pattern Recognition. *In*: J CORCHADO, L. A.; FYFE, C. (Eds.). . **Artificial Neural networks in pattern Recognition**. [S.l.] University of Paisley, 2002. p. 67–84.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 365, n. 1851, p. 303–315, 2007. https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928

FORREST, S. *et al.* Self-nonself discrimination in a computer. IEEE COMPUTER SOCIETY SYMPOSIUM ON RESEARCH IN SECURITY AND Privacy, p. 202–

212, 1994. Proceedings […]

GARCIA, M. S. **Análise de Defeitos em Sistemas Mecânicos Rotativos a partir da Monitoração de Vibrações.** Dissertação (Mestrado) -COPPE/UFRJ, Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2005. 119 p.

LIMA, F. P. A. *et al.* Artificial immune systems with negative selection applied to health monitoring of aeronautical structures. **Advanced Materials Research, Hong King**, v. 871, p. 283–289, 2013. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.871.283

LIMA, F. P. A. *et al.* Monitoramento da Integridade de Estruturas Aeronáuticas Utilizando um Método Inteligente Baseado em Sistemas Imunológicos Artificiais. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 2, n. 1, 2015. https://doi.org/10.5540/03.2014.002.01.0038

OLIVEIRA, D. C.; CHAVARETTE, F. R.; OUTA, R. Monitoramento de integridade estrutural de um rotor utilizando algoritmos de sistemas imunológicos artificiais com seleção negativa e seleção clonal. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, abr. 2020. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3546

OUTA, R. **Supressão do movimento caótico de um rotor dinâmico utilizando o controle linear ótimo**. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdadae de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, SP, 2017.

OUTA, R.; CHAVARETTE, F. R.; FARIA, G. A. Comparative Study of the Dynamics Between Rolling Bearings of a Dynamic Rotor. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 104, n. 1, p. 135–143, 2015. https://doi.org/10.12732/ijpam.v104i1.11

PERES, R. M. **Modelagem por elementos finitos e análise experimental aplicadas ao estudo da dinâmica de um rotor Jeffcott. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenahria Mecânica) - Universidade Estadual Paulista,** Guaratinguetá, SP, 2016.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2009.

RYTTER, A. **Vibration based inspection of Civil Engineering structures**. University of Aalborg, Denmark, 1993.

SANTOS, D. C. *et al.* Monitoramnto Inteligente da Integridade Estrutural de um Quadro de Bicicleta: Uma Melhoria no Transporte Sustentável. *In*: **Novas Técnologias Aplicadas a Saúde:** Inovação, Internet das Coisas, Horizontes e Desafios. Mossoró- RN, 2021. p. 263–283.

SANTOS, D. C.; LOPES, M. L. M. **Método Inteligente Baseado em Sistemas Imunológicos Artificiais Aplicado ao Monitoramento de Falhas em um Quadro de Bicicletas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, SP, 2020.

SOTELO JUNIOR, J. **Introdução às vibrações mecânicas**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

WORDEN, K.; DULIEU-BARTON, J. M. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. **Structural Health Monitoring**, v. 3, n. 1, p. 85–98, 2004. https://doi.org/10.1177/1475921704041866

XIANG-JUN, C.; ZHAN-FENG, G.; QIANG, G. Application of Wavelet Analysis in Vibration Signal Processing of Bridge Structure. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASURING TECHNOLOGY AND MECHATRONICS AUTOMATION, , 2010. p. 671–674