

Análise de confiabilidade estrutural em sinais de excitação randômica aplicando métodos estatístico linear-experimental e da bioengenharia

Structural reliability analysis in randomic excitation signs applying linear-experimental and bioengineering statistical methods

Análisis de fiabilidad estructural en signos de excitación aleatoria aplicando métodos estadísticos lineal-experimentales y de bioingeniería

Recebido: 01/09/2020 | Revisado: 06/09/2020 | Aceito: 07/09/2020 | Publicado: 08/09/2020

Dayene Kaori Shiino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8959-564X>

Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Brasil

E-mail: dayene.shiino@fatec.sp.gov.br

Roberto Outa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8649-1722>

Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Brasil

E-mail: roberto.outa@fatec.sp.gov.br

Fabio Roberto Chavarette

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-3392>

Universidade Estadual Paulista, Brasil

E-mail: fabio.chavarette@unesp.br

Aparecido Carlos Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-3392>

Universidade Estadual Paulista, Brasil

E-mail: aparecido.carlos@unesp.br

Lucas Henrique dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1348-9728>

Universidade Estadual Paulista, Brasil

E-mail: lucas@fateccatanduva.edu.br

Resumo

Este trabalho demonstra um estudo de métodos estatísticos lineares-experimental e do sistema imunológico artificial de seleção negativa, aplicados a excitação randômica de um sistema

dinâmico estrutural. No desenvolvimento deste trabalho foi desenvolvido uma estrutura shear building de dois andares excitado randomicamente, e a falha foi causada por uma perturbação externa aleatória, cujo sinal ruidoso foi tratado pelo filtro de Wiener e posteriormente aplicado o método estatístico linear-experimental e sistema imunológico artificial de seleção negativa. O resultado de ambas as aplicações permitiu uma análise direcionada e objetiva, demonstrando que o espectro do sinal contém níveis qualitativos e quantitativos de grande significância em aplicações na engenharia.

Palavras-chave: Vibração; Sistema imunológico artificial; Inteligência artificial; Filtro de Wiener; SHM.

Abstract

This work demonstrates a study of linear-experimental statistical methods and the negative selection artificial immune system, applied to the random excitation of a structural dynamic system. In the development of this work, a two-storey shear building structure was randomly excited, and the failure was caused by a random external disturbance, whose noisy signal was treated by the Wiener filter and subsequently applied the linear-experimental statistical method and artificial immune system. negative selection. The result of both applications allowed a targeted and objective analysis, demonstrating that the signal spectrum contains qualitative and quantitative levels of great significance in engineering applications.

Keywords: Vibration; Artificial immune system; Artificial intelligence; Wiener filter; SHM.

Resumen

Este trabajo demuestra un estudio de métodos estadísticos lineales-experimentales y el sistema inmunológico artificial de selección negativa, aplicados a la excitación aleatoria de un sistema dinámico estructural. En el desarrollo de este trabajo se excitó aleatoriamente una estructura de edificio de cizalla de dos pisos, y la falla fue provocada por una perturbación externa aleatoria, cuya señal ruidosa fue tratada por el filtro Wiener y posteriormente se aplicó el método estadístico lineal-experimental y sistema inmunológico artificial. selección negativa. El resultado de ambas aplicaciones permitió un análisis dirigido y objetivo, demostrando que el espectro de la señal contiene niveles cualitativos y cuantitativos de gran trascendencia en aplicaciones de ingeniería.

Palabras clave: Vibración; Sistema inmunológico artificial; Inteligencia artificial; Filtro Wiener; SHM.

1. Introdução

Entender o comportamento de um sistema dinâmico estrutural é um desafio, pois é possível se aplicar diferentes conceitos teóricos para se obter uma informação deste sistema. Modelos de sistemas não lineares devem ser aplicados para que o sistema dinâmico em estudo possa ter resultados que o qualifiquem parametricamente, assim, o desempenho do método de análise se torna fundamental e relevante nas atividades de medição.

Quando dois blocos de terra repentinamente se movem ocasionando o escorregamento, nota-se um plano com falha (falha), e assim, a energia do escorregamento é transmitida pelo solo se propagando e causando tremores do choque principal. Este princípio é considerado um terremoto (Okamoto, 1984).

Uma das necessidades na engenharia é nivelar a máquina ao solo para garantir a sua operacionalidade e segurança dentro das especificações em projeto. A máquina quando em funcionamento é capaz de produzir movimentos, cuja energia se propaga para o solo, transferindo-a ao longo do tempo em uma determinada distância. A propagação desta energia, se não contida ou enclausurada, pode causar danos na estrutura física de prédios e em máquinas localizados em sua vizinhança.

Este trabalho demonstra o comportamento de um sistema dinâmico estrutural excitado por um sistema randômico na base de sua estrutura, cuja vibração é captada na primeira e segunda base sustentada por vigas de aço. A vibração randômica se propaga através das vigas e dos materiais conectados entre si e, com a constância de energia no sistema, é possível entender a forma de vibrar. O objetivo deste trabalho é detectar as falhas de um sistema dinâmico estrutural, utilizando o algoritmo do sistema imunológico artificial de seleção negativa. Intrinsecamente ao objetivo, são inseridos: o conceito matemático do filtro de Wiener para a eliminação dos ruídos indesejados; o conceito de estatística experimental para analisar e entender o comportamento do sistema com falhas utilizando a função de densidade normal, exponencial e Weibull; o conceito do sistema imunológico artificial de seleção negativa para a separação de grupos dos sinais data-Wiener, considerando os diferentes graus de correspondência do algoritmo.

Um grupo de pesquisadores investigam o perfil das encostas do pós-terremoto aplicando o método de Newmark entendendo-o ao limite do equilíbrio e envolvendo a resposta dinâmica do sistema. O método de Newmark é a predição dos campos de aceleração, velocidade e deslocamento generalizado no instante final de um intervalo discreto, com base nos valores iniciais (Zheng et al., 2020). Um outro grupo de pesquisadores investigam os

efeitos dos danos em estruturas simulando múltiplas fissuras em diferentes locais do experimento e no modelo numérico, aplicando o conceito de análise de vibração (Khan et al, 2020). Um outro grupo, propõe um método alternativo de análise dinâmica não linear utilizando um algoritmo que compara os espectros de frequência objetivando a correspondência espectral eliminando a necessidade de utilizar o método endurance time (ET) (Mashayekhi et al, 2020).

Nota-se que diferentes pesquisadores tendem a estudar comportamentos de sistemas dinâmicos para prever situações e aplicar as informações dos sistemas na melhora da qualidade de vida e até mesmo na segurança do ser humano.

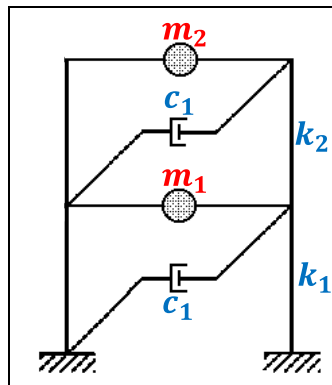
2. Vibrações Randômicas

O tremor do solo ocorre pelo deslizamento irregular e pelas falhas da formação terrestre, dentre essas condições, no solo são ocorrem as atividades de reflexões, refrações e atenuações aleatórias múltiplas. Esta condição determina a importância da modelagem estocástica de forte movimento no solo que descreve a resposta em termos probabilísticos (Chopra, 2017).

A maioria das estruturas são desenvolvidas utilizando o conceito de sistemas determinísticos, considerando as respostas das estruturas a cargas de tremor do solo pré-determinadas, assim são utilizadas as cargas do projeto sísmico baseadas em: a análise dinâmica; e no procedimento estático equivalente. O procedimento da análise dinâmica está relacionado a análise da resposta do espectro (*response spectrum analysis – RSA*), e o procedimento estático equivalente, especifica a força inercial induzida por terremoto na estrutura relacionado a cargas estáticas equivalentes baseado na aplicação de equações empíricas (Chopra, 2017).

A representação de um modelo simples de sistema dinâmico que represente uma estrutural predial de diferentes andares é chamada de *shear building*, e pode ser demonstrada por um diagrama de corpo livre na Figura 1 (Bangash, 2011; Chopra, 2017).

Figura 1 – Diagrama de Corpo Livre da Equação Geral do Movimento.



Fonte: Adaptado Chopra (2012).

A equação do movimento deste sistema pode ser escrita como,

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F(t) \quad (1)$$

esta equação escrita matricialmente é,

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

e em um sistema homogêneo, a equação é igual a zero geral (Beards, 1996; Chopra, 2012; Bangash, 2011).

No sistema dinâmico, excitado na base é considerado uma atividade sísmica, cuja resposta a excitação demonstra as condições da transferência de energia ao sistema (Chopra, 2017). A equação geral do movimento é reescrita considerando o deslocamento inercial y_g , resultante da energia sísmica, assim,

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = -m\ddot{y}_g \quad (3)$$

O termo $-m\ddot{y}_g$ corresponde ao carregamento efetivo na base da estrutura $F_{ef} = -m\ddot{y}_g$. Introduzindo este termo na equação geral do movimento, teremos,

$$\ddot{y} + 2\rho\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = -\ddot{y}_g(t) \quad (4)$$

onde a fator de amortecimento pode ser descrito como $\rho = \frac{c}{2m\omega_n}$ (Rajasekaram, 2009).

3. Oscilações Randômicas: Propriedades Estatísticas

A variável randômica é um valor instantâneo que não pode ser previsto e não torna possível deduzi-lo em um instante qualquer. O processo randômico (estocástico) é considerado um conjunto de funções de tempo $f(t)$, variando t entre $-\infty$ e $+\infty$, e que pode ser definido por propriedades estatísticas envolvendo a probabilidade (Lalanne, 2002).

As vibrações aleatórias, consideradas um ruído, são formadas por uma faixa contínua de frequência, amplitude e fase que variam aleatoriamente com o tempo, o qual em algumas situações podem ser definidas como uma distribuição senoidal contínua de todas as frequências, com variação no tempo da amplitude e fase. O método de análise de vibrações randômicas pode ser feito pela aplicação de métodos estatísticos do sinal, no domínio do tempo ou utilizando o espectro de frequência geralmente associado a um filtro (Lalanne, 2002).

A estatística experimental determina o entendimento do comportamento de um fenômeno físico de um sistema qualquer, utilizando o conceito da abordagem da informação e a teoria de decisão. Na abordagem da informação a estimativa é maximizada, e na teoria da decisão a perda envolvida é minimizada sobre o valor do parâmetro (James, 2006; Wolstenholme, 1999).

A função de densidade de probabilidade normal ou Gaussiana é aplicada quando as amostras experimentais se encontram concentradas em torno do valor central (média da população),

$$f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (5)$$

sendo σ_x é um valor positivo real; x representa a amostra; μ_x é a média amostral. A variância pode ser calculada como, $V_N(x) = \sigma^2$ (James, 2006; Wolstenholme, 1999). A função de densidade de probabilidade está associada à condição de aproximação de curvas de medidas físicas, e a distribuição cumulativa, considerada uma integral de probabilidade normal ou função de erro, é (James, 2006; Wolstenholme, 1999),

$$f_{eN}(x) = \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (6)$$

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (7)$$

A função de densidade de probabilidade exponencial, utilizada para determinar as características de amostras experimentais de taxa de falhas constantes, determina um modelo de tempo de vida de produtos ou materiais,

$$f_E(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (8)$$

sendo λ é um número real positivo; x representa a amostra. A variância pode ser calculada como, $V_E(x) = \frac{1}{\lambda^2}$ (James, 2006; Wolstenholme, 1999).

A função de distribuição de Weibull é utilizada para determinar o tempo de falha de determinados componentes,

$$f_W(x) = \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^{\eta-1} e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^\eta}; \quad x \geq 0 \quad (9)$$

onde, η, σ são números reais positivos, e a variância é $V_W(x) = \sigma^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{\eta} + 1\right) - \left[\Gamma\left(\frac{1}{\eta} + 1\right) \right]^2 \right\}$ (James, 2006; Wolstenholme, 1999).

3.1. Espectro do Sinal – Filtro de Wiener

O filtro de Wiener é uma técnica que prevê uma determinada condição do sinal aplicado a sinais contínuos unidimensionais, obtendo o erro quadrático médio mínimo, e pode ser também generalizado para sinais discretos (Kuo, 1980; Poularikas & Ramadan, 2006).

O filtro de Wiener é uma generalização de uma equação integral de convolução, escrita como,

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(x-x') f(x') dx' = f_0(x) \quad (10)$$

sendo $-\infty < x < \infty$, $f(x)$ uma função desconhecida (Daniele & Zich, 2014; Kailath, 1981). A solução desta equação, escrita na transformada de Fourier é,

$$F(\alpha) = [G(\alpha)]^{-1}F_0(\alpha) \quad (11)$$

onde $F(\alpha)$, $G(\alpha)$ e $F_0(\alpha)$ são transformadas de Fourier de $f(x)$, $g(x)$ e $f_0(x)$ respectivamente, de acordo com a definição, $F(\alpha) = \mathbb{F}[f(x), x, a] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{j\alpha x} dx$; $G(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{j\alpha x} dx$; $F_0(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(x) e^{j\alpha x} dx$ (Daniele & Zich, 2014; Kailath, 1981). A equação da integral de Wiener consiste em assumir a integração em um domínio semi-infinito de 0 a $-\infty$, e assim,

$$\int_0^{-\infty} g(x-x')f(x')dx' = f_0(x) \quad (12)$$

sendo $0 < x < \infty$ (Daniele & Zich, 2014; Kailath, 1981). Reescrevendo a equação $\int_0^{-\infty} g(x-x')f(x')dx' = f_0(x)$, como um produto de convolução, teremos,

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(x-x')f(x')u(x')dx' = f_0(x)u(x) + f^s(x)u(-x) \quad (13)$$

sendo $-\infty < x < \infty$, o qual $u(x)$ é uma unidade de função de passo, e f^s é uma nova incógnita que representa a continuação no lado esquerdo da equação, $\int_{-\infty}^{\infty} g(x-x')f(x')u(x')dx'$, para $x < 0$ (Daniele & Zich, 2014; Kailath, 1981). Aplicando a transformada de Fourier na equação, teremos,

$$G(\alpha)F_+(\alpha) = F^s(\alpha) + F_{0+}(\alpha) \quad (14)$$

e $F_{0+}(\alpha)$ e $F^s(\alpha)$ são respectivamente: a transformada de Fourier da função do eixo direito $f_0(x)u(x)$, e da função do eixo esquerdo $f^s(x)u(-x)$. A equação na forma espectral é $G(\alpha)F_+(\alpha) = F^s(\alpha) + F_{0+}(\alpha)$ (Daniele & Zich, 2014).

A equação de Wiener é considerada um vetor ou um escalar. Os escalares envolvem apenas quantidades escalares, já nos vetoriais, os vetores são de ordem n, como nos argumentos, $F_+(\alpha)$, $F_{0+}(\alpha)$, e $F^s(\alpha)$, e a quantidade de matriz de mesma ordem $G(\alpha)$. A matriz $G(\alpha)$ é chamada de kernel do operador de Wiener e é a inversa $[G(\alpha)]^{-1}$, escrita como $G^{-1}(\alpha)$ (Daniele & Zich, 2014).

4. Sistema Imunológico Artificial

O Sistema Imunológico é uma característica inerente a todos os seres vivos, a resistência, em maior ou menor grau, aos invasores. O sistema imunológico de um ser vivo é uma característica fundamental para sua sobrevivência, e por isso, precisa atuar de forma eficiente (Dasgupta & Niño, 2009; Tan, 2016).

Sua principal função é garantir o pleno funcionamento do organismo, e por este motivo, cientistas da área de computação tem demonstrado grande interesse em seu funcionamento e aplicações computacionais. Pode-se utilizar a mesma lógica e propriedades para solucionar diversos problemas, como, por exemplo, a segurança de uma base de dados confidencial. Algumas das principais propriedades de um sistema imunológico são (Lima et al, 2017):

- Unicidade: o sistema imunológico é único para cada indivíduo.
- Detecção distribuída: os detectores pequenos e eficientes, altamente distribuídos, e não estão sujeitos a um controle centralizado.
- Detecção imperfeita: não é necessário que todo agente patogênico seja completamente detectado.
- Detecção de anomalias: o sistema imunológico pode detectar e reagir a agentes patogênicos novos.
- Aprendizado e memória: o sistema imunológico pode aprender padrões e reconhecer agentes patogênicos para que as respostas a estes agentes sejam bem mais rápidas em um novo contato.

Tendo isso em mente, existem diversos tipos de mecanismos que podem ser utilizados em sistemas imunológicos, como Seleção Clonal, Seleção Negativa, entre outros.

O mecanismo de seleção negativa busca fornecer tolerância às células próprias do organismo, assim é possível agir apenas em antígenos desconhecidos, preservando o bom funcionamento do sistema. Biologicamente, este processo ocorre na geração das células T, no timo. Durante o processo de geração das células T, são criados receptores através de um processo de rearranjo genético. Após a criação, passam por um mecanismo de monitoramento que é chamado de seleção negativa. As células T que reagem às proteínas próprias do corpo são destruídas, e somente as células que não se conectam a estas proteínas são liberadas para o

resto do organismo. Estas células T circulam no organismo para realizar as funções imunológicas e proteger o organismo contra antígenos (Lima et al, 2017).

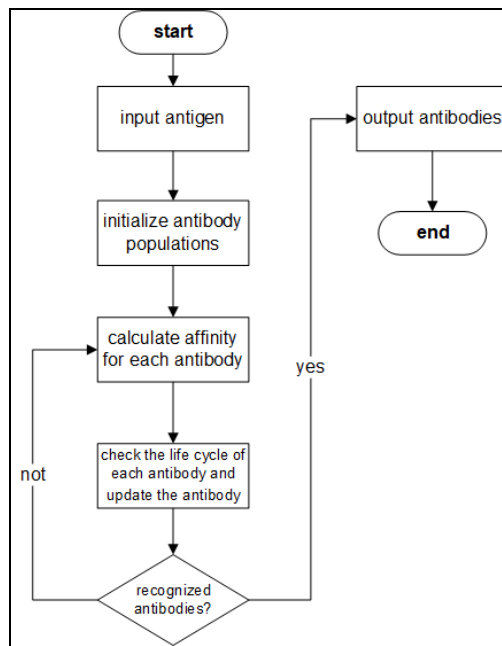
Tendo os conceitos de sistema imunológico e seleção negativa em mente, é possível recriar esta lógica através de algoritmos para que sejam detectadas anomalias em diversos sistemas artificiais, como por exemplo, falhas em componentes de sistemas mecânicos.

O algoritmo de seleção negativa (NSA) (Forrest, 1994), é inspirado neste conceito. A ideia principal é a geração de um conjunto de detectores binários, que possam verificar a relação próprio/não-próprio de informações presentes em um banco de dados. Este algoritmo se baseia em três passos fundamentais (Lima et al, 2017):

- Definição do próprio como sendo uma cadeia de dados X de tamanho limitado.
- Geração de cadeias aleatoriamente e avaliação da similaridade entre cada uma delas e as cadeias X (conjunto próprio). Caso a similaridade seja superior a um determinado limiar, isto indica que houve um reconhecimento (detecção) do conjunto próprio, e que, portanto, a cadeia deve ser rejeitada; caso contrário deve-se armazená-la em um conjunto de detectores.
- Monitoramento de possíveis alterações no conjunto de cadeias que se deseja proteger utilizando os detectores gerados. Caso a similaridade entre um detector e uma das cadeias de X seja maior que o limiar pré-estabelecido, é detectada a presença de uma anomalia, visto que os detectores nunca devem reconhecer cadeias do conjunto próprio.

A Figura 2 mostra a etapas do AIS para o desenvolvimento do algoritmo (Dasgupta & Niño, 2009; Tan, 2016).

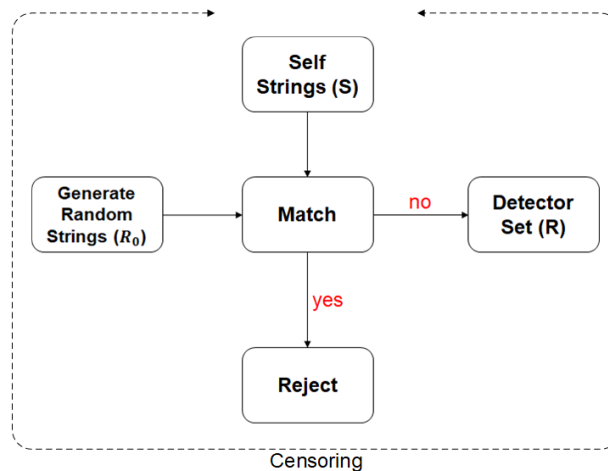
Figura 2 – Etapas de Desenvolvimento do Algoritmo AIS.



Fonte: Tan (2016).

A Figura 3 ilustra a geração de detectores, considerado a fase de censuriamento, e a Figura 4 mostra a fase de monitoramento (Forrest et al., 1994).

Figura 3 – Censoreamento (Geração de Detectores).

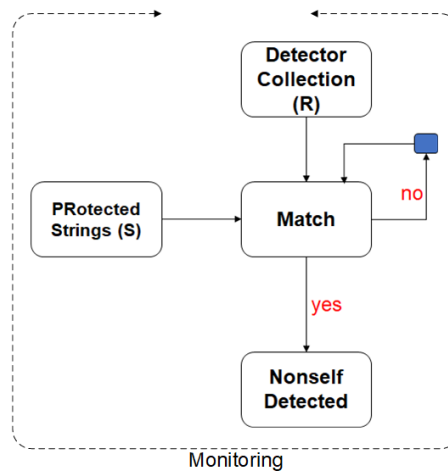


Fonte: Forrest et al., (1994).

O conceito de correspondência (*match*) perfeita entre duas cadeias (*strings*) de tamanhos iguais, significa que cada local da cadeia (*string*) contém símbolos idênticos, porém, este caso é considerado extremamente raro, e assim, é necessário introduzir o conceito de correspondência parcial. A regra da correspondência parcial é aplicada quando *r* correspondências próximas tem símbolos e posições correspondentes, assim, duas cadeias

quaisquer (x, y) são correspondentes (verdadeiras) quando x e y , correspondem pelo menos a r locais próximos. A probabilidade (P_m) de duas cadeias quaisquer se corresponderem pode ser calculada pela equação,

Figura 4 – Monitoramento (Monitoramento dos Dados).



Fonte: Forrest et al., (1994).

O conceito de correspondência (*match*) perfeita entre duas cadeias (*strings*) de tamanhos iguais, significa que cada local da cadeia (*string*) contém símbolos idênticos, porém, este caso é considerado extremamente raro, e assim, é necessário introduzir o conceito de correspondência parcial. A regra da correspondência parcial é aplicada quando r correspondências próximas tem símbolos e posições correspondentes, assim, duas cadeias quaisquer (x, y) são correspondentes (verdadeiras) quando x e y , correspondem pelo menos a r locais próximos. A probabilidade (P_m) de duas cadeias quaisquer se corresponderem pode ser calculada pela equação,

$$P_m \approx \left(\frac{\binom{(l-r)(m-1)}{m-1}}{m^r} \right) \quad (15)$$

onde, l corresponde ao número de símbolos da cadeia (comprimento); m corresponde ao número de símbolos do alfabeto; e r é o número de correspondência próxima necessárias para ocorrer a correspondência (Forrest et al., 1994).

Considerando que, a correspondência de proximidade seja determinada (r), é introduzido o conceito da taxa de afinidade das cadeias (T_{af}), que determina o grau de

semelhança necessário para que se ocorra a correspondência. Esta condição pode ser descrita, considerando a equação,

$$T_{af} = \left(\frac{A_n}{A_t} \right) 100 \quad (16)$$

onde, A_n corresponde ao número de cadeias normais no problema (própria), A_t corresponde ao número total de cadeias do problema (cadeias próprias e não-próprias) (Bradley, et al., 2002).

A quantificação da afinidade dos padrões analisados (Q_{af}), pode ser definido matematicamente pela equação,

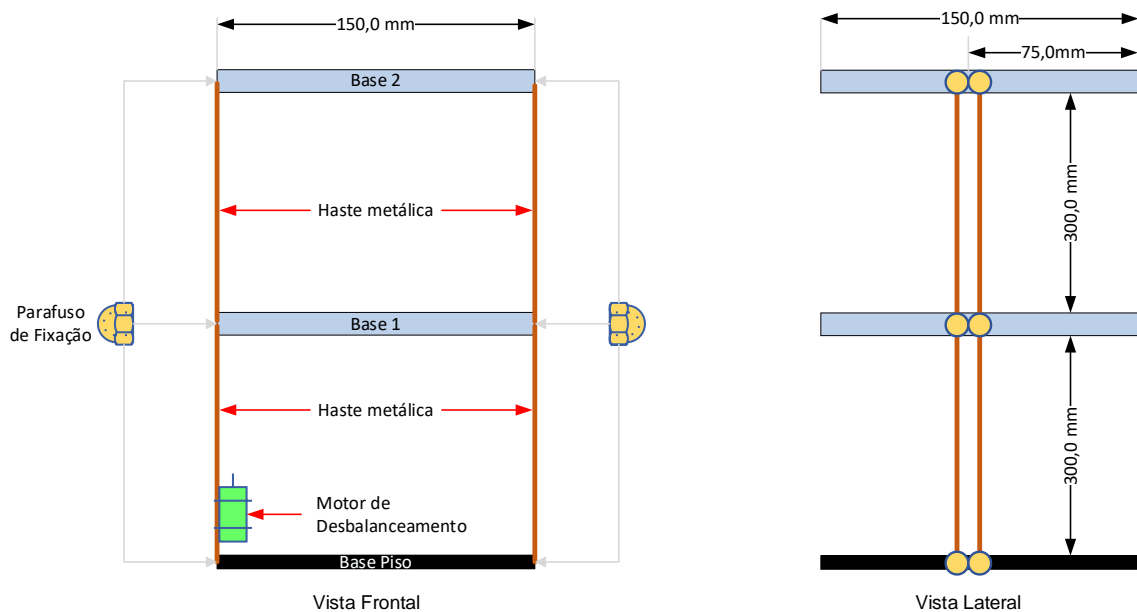
$$Q_{af} = \frac{\sum_{i=1}^L V_c}{L} 100 \quad (17)$$

onde, V_c corresponde as variáveis correspondentes; L corresponde a quantidade total de variáveis; $\sum_{i=1}^L V_c$ corresponde a somatória das variáveis correspondentes. Assim, para que ocorra a correspondência com os padrões deve-se existir a condição $Q_{af} \geq T_{af}$ (Lima et al, 2013).

5. Metodologia

A metodologia experimental baseia-se na condição de que o protótipo experimental deve conter o comportamento físico de um sistema dinâmico *shear building*. A Figura 5 mostra o diagrama de corpo livre do protótipo experimental.

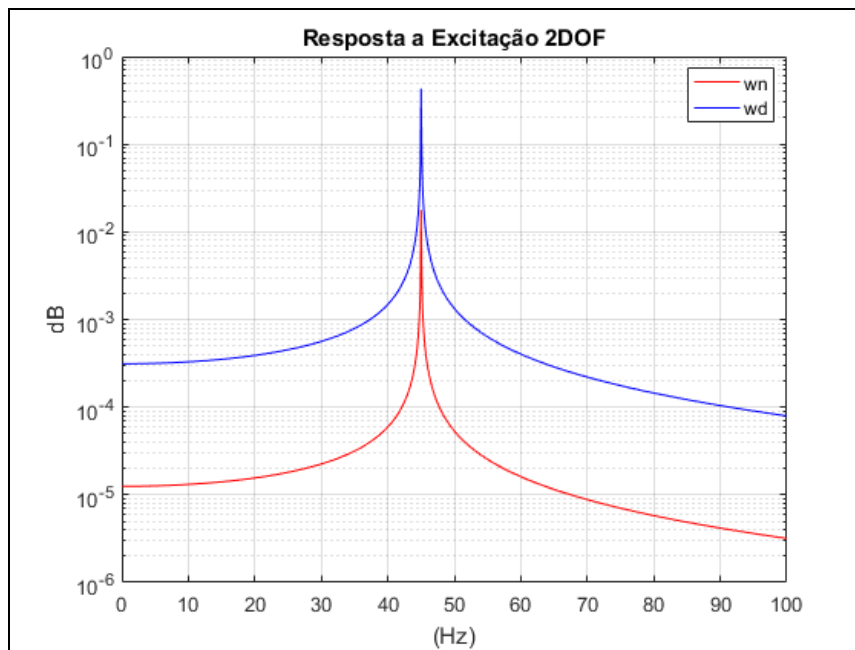
Figura 5 – Diagrama de Corpo Livre.



Fonte: Autores.

Note que a estrutura contém dimensões que possibilitam análise de resistência de materiais e podem ser posicionadas de forma a criar comportamento diversos a serem analisados. Neste trabalho, em específico, investiga-se o comportamento do modo de vibrar da estrutura, dada a excitação randômica do motor fixo na haste. À partir de que o sistema dinâmico estrutural tenha a excitação randômica constante, são inseridos os sensores de captação de vibração fixos no centro de cada base 1 e 2. Cada base é composta de uma massa, $m_1 = 200g$ e $m_2 = 200g$, e os parâmetros de rigidez $k = 20 \cdot 10^3 N/m$ (8 hastes), e amortecimento $c = 10^{-3} Nm$ são definidos para a experimentação. Desta forma, os sinais coletados em cada base, podem demonstrar diferentes respostas à excitação que permitem analisar o sistema sempre sob novas perspectivas. A simulação numérica do sistema *shear building (two floor)* foi desenvolvida considerando as condições iniciais do sistema. A Figura 6 mostra a FRF do sistema das condições iniciais.

Figura 6 – FRF Shear Building – Condições Iniciais.



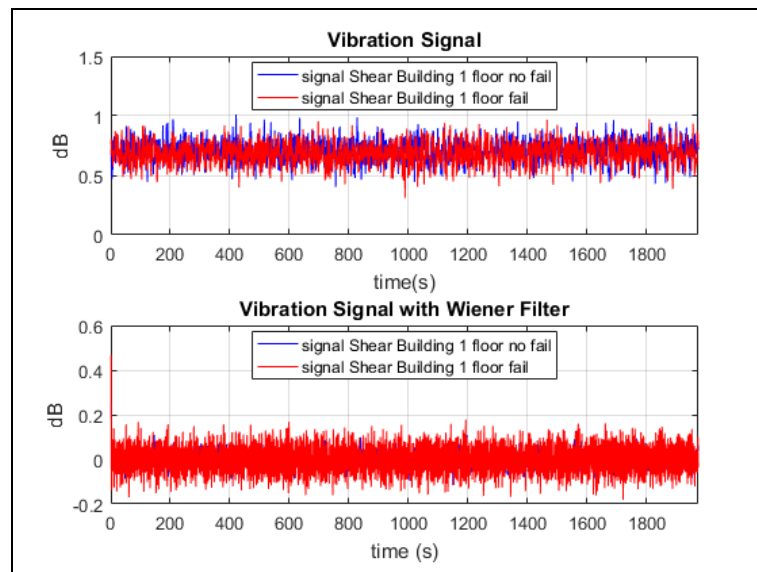
Fonte: Lab. Sisplexos.

O ω_n corresponde a frequência natural do sistema, e o ω_d corresponde a frequência de amortecimento estrutural.

O sistema de aquisição de dados consiste de: 02 sensores de vibração (acelerômetro de três eixos MPU-6050), 02 placas de arduino UNO, fios e cabos para a conexão, 01 motor com massa de desbalanceamento (micro motor 12V – 4600 rpm – AK280). A experimentação se inicia com o motor de massa de desbalanceamento acionado de forma constante e a aquisição do sinal se divide em duas fases distintas: a primeira fase inicia na aquisição do sinal na base 1 e após na base 2, formando ao total um banco de dados de 6 sinais de tamanho 1 x 4000 de cada base. A segunda fase tem a mesma configuração de aquisição do sinal, porém, para cada momento de captura do sinal foi inserido uma força externa aleatória (impulso) na haste de posicionamento do motor de desbalanceamento. Desta forma, esta força ou impulso, permite que o sistema tenha uma perturbação aleatória e não constante no sistema. Portanto, para cada base existem 6 sinais normais sem excitação e 6 sinais não-normais com perturbação aleatória, totalizando 12 sinais para cada base.

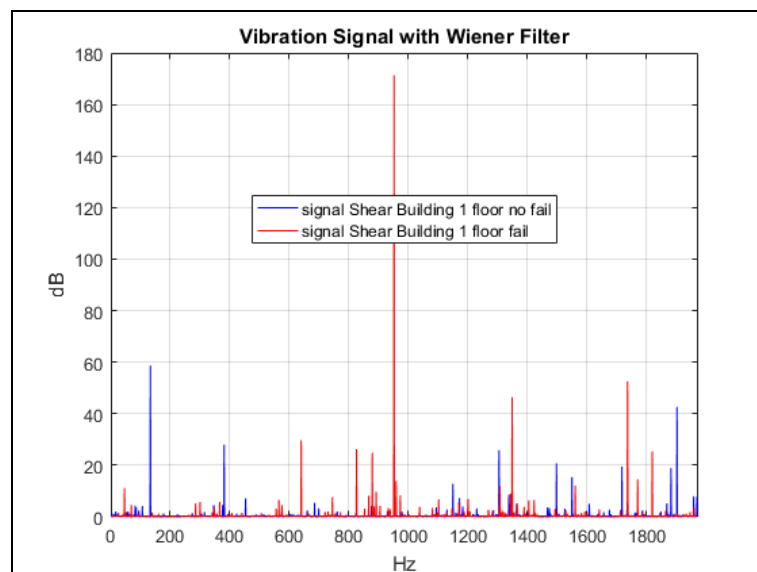
O resultado geral dos 6 sinais normais (azul) e não-normais (vermelho), das bases 1 e 2, foram convertidos no conceito de média para demonstrar o comportamento do sistema. A Figura 7 mostra o resultado dos sinais da primeira base no domínio do tempo considerando o sinal com ruído e o sinal com o filtro de Wiener, e a Figura 8 mostra a FRF do sinal com filtro de Wiener da base 1.

Figura 7 – Comparativos de Sinais Sem Falha e Com Falhas (Base 1 - Wiener Filter).



Fonte: Lab. Sisplexos.

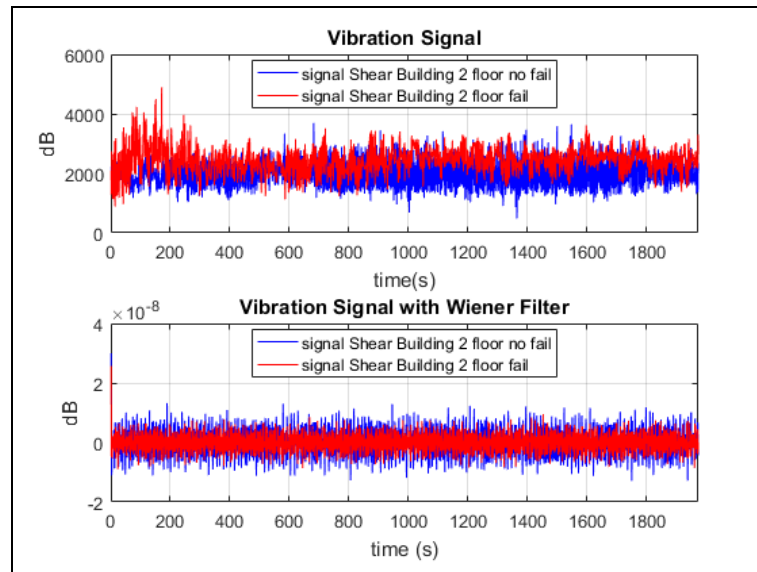
Figura 8 – Comparativos de Sinais Sem Falha e Com Falhas (Base 1 - Wiener Filter).



Fonte: Lab. Sisplexos.

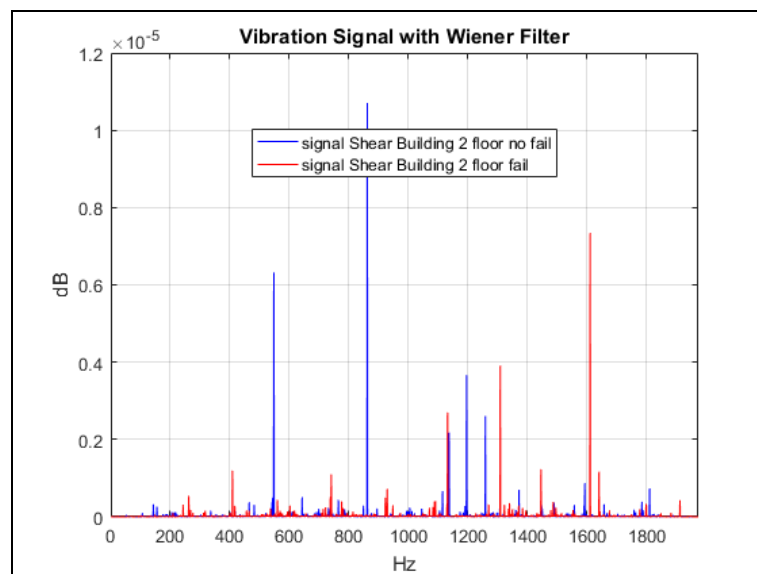
A Figura 9 mostra o resultado dos sinais da segunda base no domínio do tempo considerando o sinal com ruído e o sinal com o filtro de Wiener, e a Figura 10 mostra a FRF do sinal com filtro de Wiener da base 2.

Figura 9 – Comparativos de Sinais Sem Falha e Com Falhas (Base 2 - Wiener Filter).



Fonte: Lab. Sisplexos.

Figura 10 – Comparativos de Sinais Sem Falha e Com Falhas (Base 2 - Wiener Filter).

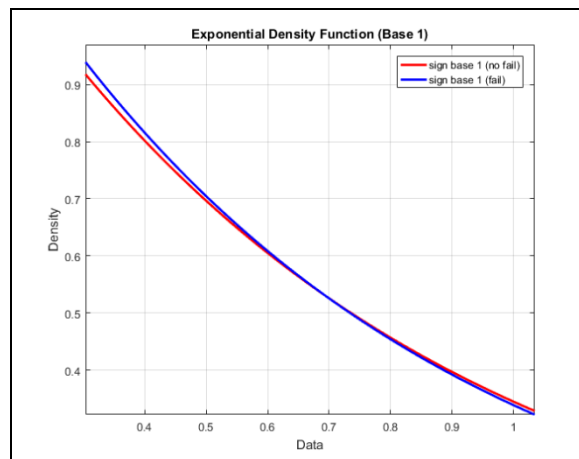


Fonte: Lab. Sisplexos.

Note que, o sinal com ruído nas bases 1 e 2 tem diferentes amplitudes e não apresentam uma forma fácil de entendimento, porém, quando são filtrados pelo conceito matemático do filtro de Wiener, possuem já uma característica de melhor compreensão. A FRF dos sinais normais e não-normais, possibilitam uma melhor e racional compreensão sobre o conceito do comportamento do sistema dinâmico excitado constante e randomicamente.

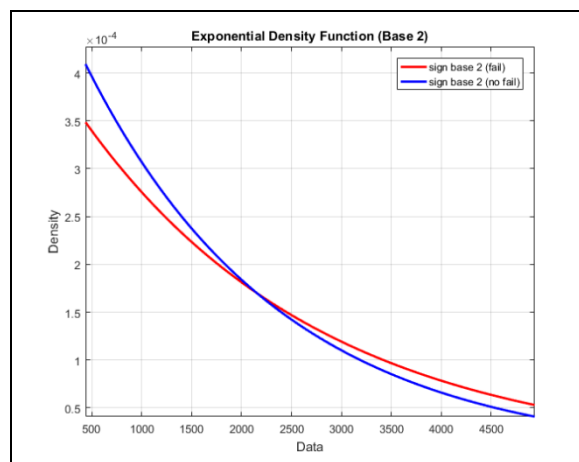
Na sequência, os sinais são tratados pelo conceito matemático da estatística linear-experimental, cujo propósito é demonstrar a diferença entre eles, considerados com uma possível falha no sistema dinâmico. As Figuras 11 e 12 demonstram o resultado da função de densidade exponencial nas bases 1 e 2, respectivamente.

Figura 11 – Resultado Estatístico da Função de Densidade Exponencial.



Fonte: Lab. Sisplexos.

Figura 12 – Resultado Estatístico da Função de Densidade Exponencial.



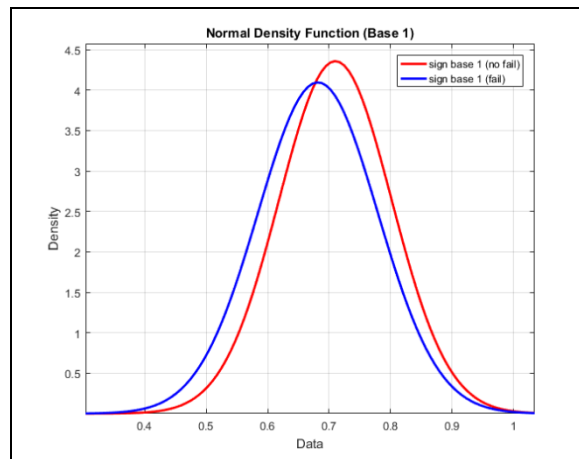
Fonte: Lab. Sisplexos.

A função de densidade exponencial tem a finalidade de determinar as características de amostras experimentais de taxas de falhas constantes, considerando um modelo de tempo de vida de produtos ou materiais, e na análise dos resultados obtidos da base 1 e 2, percebe-se que o parâmetro (parâmetro da falha), descrito no eixo y, se encontram entre 0,9 e 1,0; e o tempo de falha no eixo x, está posicionado entre 1,0 e 2,0. Considerando que o parâmetro tem a condição, é possível afirmar que o tempo de falha (eixo x) tem a mesma unidade de

tempo que o parâmetro de falha, com isso entende-se que a falha é existente. Seguindo este critério, a análise da base 2 demonstra um comportamento similar e é possível de se afirmar que a falha é existente.

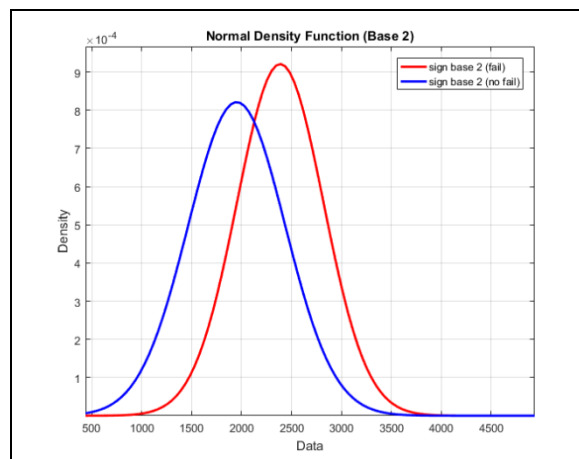
As Figuras 13 e 14 demonstram o resultado da densidade normal ou gaussiana nas bases 1 e 2, respectivamente.

Figura 13 – Resultado Estatístico da Função de Densidade Normal.



Fonte: Lab. Sisplexos.

Figura 14 – Resultado Estatístico da Função de Densidade Normal.



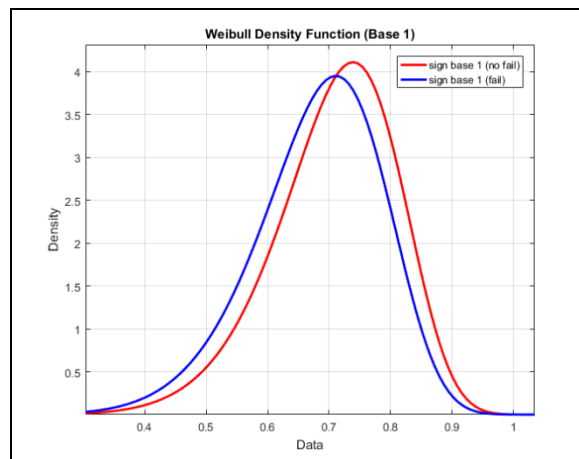
Fonte: Lab. Sisplexos.

A função de densidade normal ou gaussiana, é relevante pois demonstra a chance real de ocorrer um determinado evento sobre um intervalo de tempo, com isso, analisando o resultado da função de densidade normal da base 1, observa-se que as medias são diferentes e o desvio padrão do sinal normal tem um valor maior que o do sinal não-normal, o que

demonstra a possibilidade da existência de falhas no sistema dinâmico. Baseado neste critério, é possível de se afirmar que a análise da base 2 tem a mesma correspondência.

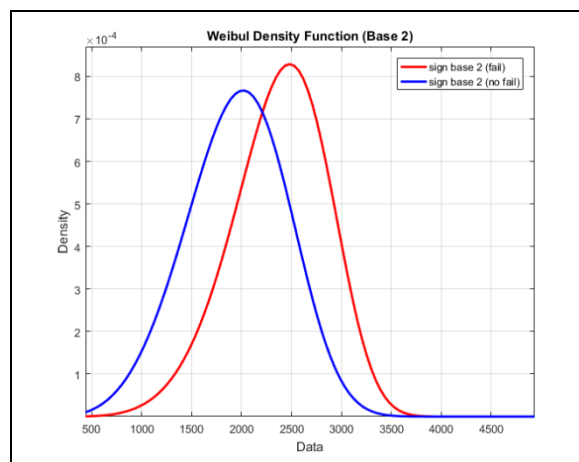
As Figuras 15 e 16 demonstram o resultado da função de densidade de Weibull nas bases 1 e 2, respectivamente.

Figura 15 – Resultado Estatístico da Função de Densidade Weibull.



Fonte: Lab. Sisplexos.

Figura 16 – Resultado Estatístico da Função de Densidade Weibull.



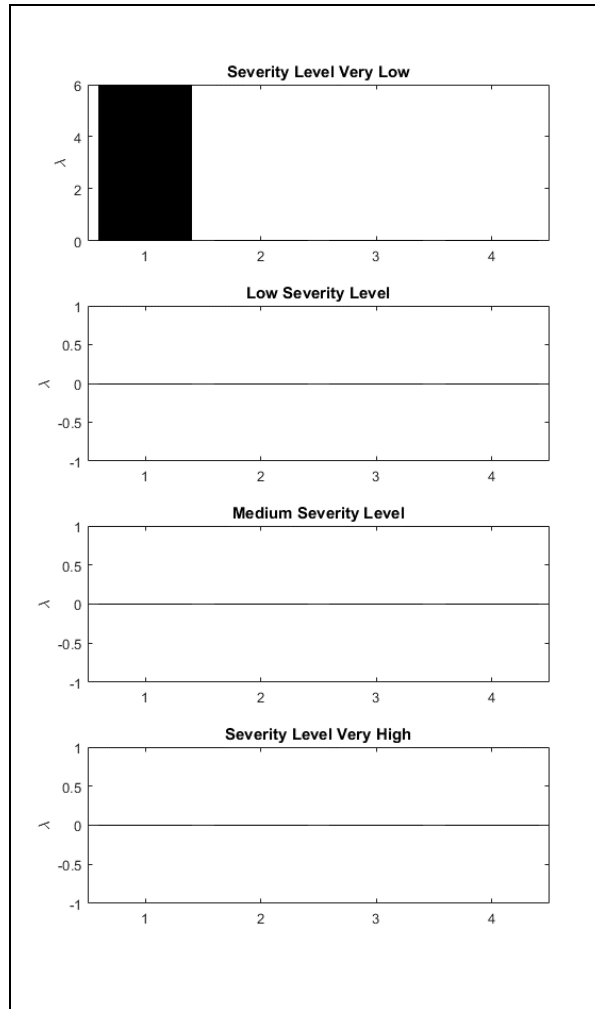
Fonte: Lab. Sisplexos.

A função de densidade de Weibull demonstra a relação do tempo de falha de um componente devido a fadiga de metais e pode ser caracterizado de forma decrescente, constante e crescente (β), com isso, observa-se que o parâmetro da forma β pode ter correspondência a condição crescente, dado a forma de distribuição do gráfico.

Após a análise estatística experimental, foi introduzido o conceito do *artificial immune system - negative selection*, cuja propriedade determina a separação e classificação dos sinais

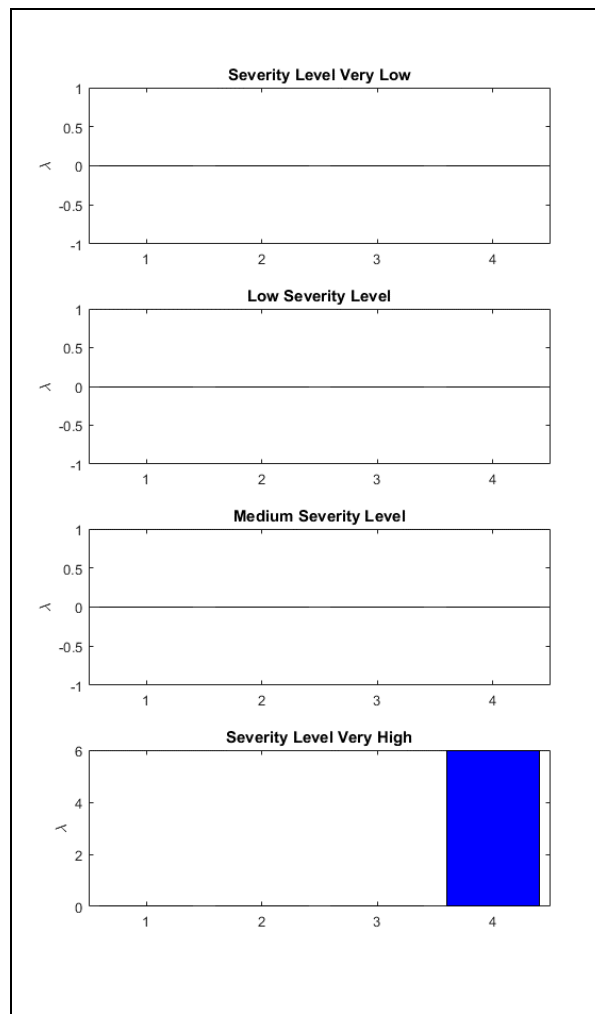
do banco de dados data-Wiener composto por 24 sinais normais e não-normais. O resultado da aplicação do algoritmo, pode ser visto nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Análise dos Sinais da Base 1.



Fonte: Lab. Sisplexos.

Figura 18 – Análise dos Sinais da Base 2.



Fonte: Lab. Sisplexos.

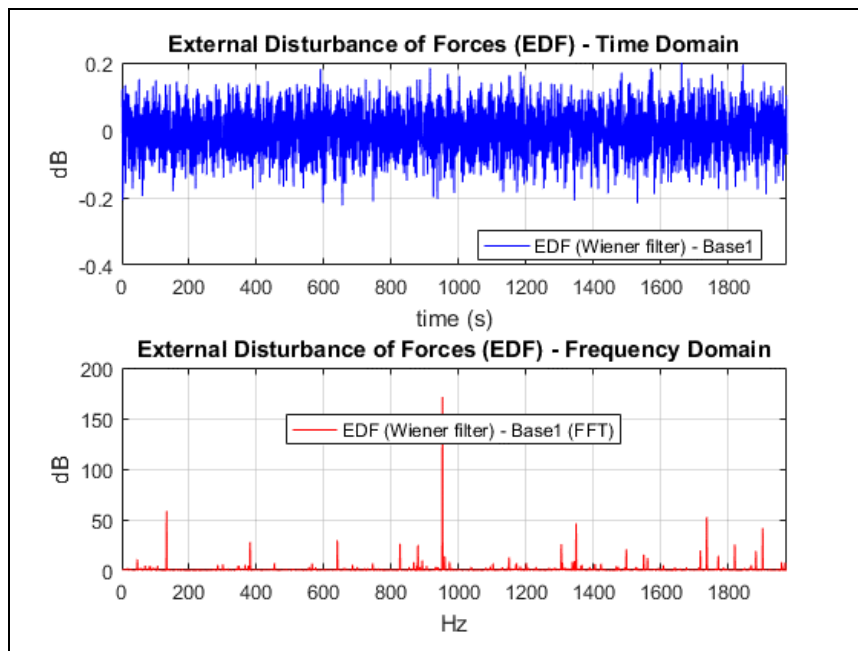
Note que, os resultados dos diferentes sinais do banco de dados data-Wiener, ao serem processados pelo algoritmo de AIS de seleção negativa, foram separados e classificados considerando os critérios de nível de severidade e grau de probabilidade de falha. A probabilidade de falha localizado no eixo x de cada grupamento, nas posições 1, 2, 3 e 4, correspondem a: probabilidade de falha baixa; probabilidade de falha moderada; probabilidade de falha alta; e por fim, probabilidade de falha muito alta. O nível de severidade da falha corresponde aos grupos de cada categorias que englobam a probabilidade de falhas, e assim, as categorias do nível de severidade são: nível de severidade muito baixo; nível de severidade baixo; nível de severidade médio; nível de severidade muito alto.

Os resultados dos sinais da base 1, demonstram que a falha tende a ser de nível de severidade baixo (em preto), com a probabilidade de falha baixa. Já a base 2 demonstra que a

falha tende a ser de nível de severidade muito alto (em azul), com probabilidade de falha muito alta.

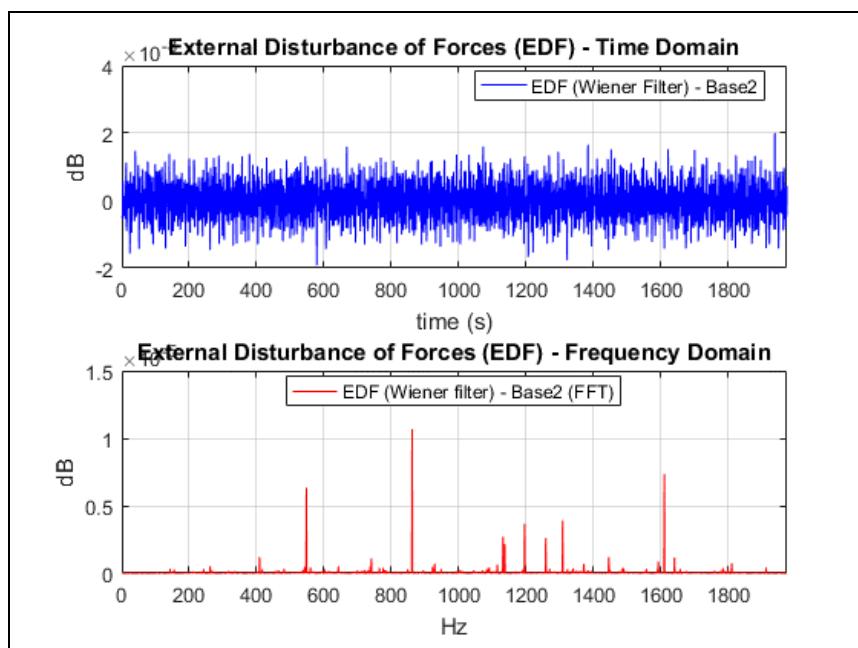
As Figuras 19 e 20 mostram o sinal resultante que alterou o comportamento da estrutura *shear building* excitada randomicamente.

Figura 19 – Perturbação Externa na Base 1.



Fonte: Lab. Sisplexos.

Figura 20 – Perturbação Externa na Base 2.



Fonte: Lab. Sisplexos.

6. Resultados e Discussão

Este trabalho aborda o princípio de excitação randômica em uma estrutura *shear building*, cuja análise de espectro permitiu identificar diferentes tipos de comportamentos do modo de vibrar.

Durante a excitação randômica foi introduzido no sistema uma força externa aleatória, considerada uma perturbação externa, que alterou o comportamento do sistema, contribuindo na dificuldade de entendimento do comportamento no espectro de frequência.

As vibrações randômicas e a perturbação, ambas consideradas um sinal ruidoso, foram analisadas através de um sistema baseando-se nos conceitos de estatística linear, estatística experimental, vibrações randômicas, filtro de Wiener e no sistema imunológico artificial de seleção negativa.

O sistema quando excitado randomicamente, varia o seu comportamento no tempo, dificultando a análise por métodos comuns de análise de vibração linear, e assim, através dos métodos estatísticos foi possível demonstrar o comportamento dos sinais ruidosos nas bases 1 e 2, e os sinais filtrados pelo filtro de Wiener nas bases 1 e 2. Os resultados das análises estatísticas aplicadas no espectro de frequência do banco de dados (data-Wiener), nas bases 1 e 2, demonstraram uma forma clara de entendimento gráfico das funções de densidade Gaussiana, Exponencial e Weibull. Cada função de densidade corresponde a um fator de análise único, como o Gaussiano demonstrou a probabilidade de ocorrência de um evento de falha; o Exponencial demonstrou a taxa de falhas constantes; o de Weibull a relação do tempo de falha baseado na fadiga da estrutura. Note que, a perturbação externa na estrutura, permitiu constituir a falha, que também pode ser demonstrado na análise de espectro, apresentado nos gráficos estatísticos.

A aplicação dos sistemas imunológicos artificiais de seleção negativa foi aplicado no banco de dados data-Wiener, para categorizar os estados de: probabilidade de falha e nível de severidade da falha, contribuindo com o entendimento da perturbação introduzida no sistema dinâmico *shear building*.

Note que, o desenvolvimento deste trabalho contém uma aplicação diferenciada considerando que o resultado do método estatístico demonstrou a falha, e o método do sistema imunológico artificial de seleção negativa, além de demonstrar a falha, potencializou a análise identificando e quantificando o data-Wiener, no aspecto da prognose de falhas.

7. Considerações Finais

Neste trabalho foi possível demonstrar dois tipos de técnicas aplicadas no espectro de frequência para sistemas excitados randomicamente. A primeira técnica, a estatística linear experimental, demonstrou a leitura e separação dos sinais sem falhas e com falhas com sucesso. Na segunda técnica, o sistema imunológico artificial de seleção negativa, demonstrou níveis qualitativos e quantitativos de análise de sinais, potencializando os critérios de tomadas de decisão do comportamento de estado do sistema dinâmico.

Aplicações desta natureza, excitados randomicamente e perturbados por forças externas aleatórias, representam diversos fenômenos da natureza. Com isso, é possível de afirmar que este trabalho contribui em diversas áreas da engenharia, como princípio de demonstração de análise de comportamento estrutural, cujo protótipo experimental e seus sistemas embarcados de baixo custo são de acesso e inteligência de fácil acesso.

Os resultados para a comunidade científico-acadêmica, permitem desenvolver a estudantes, pesquisadores, diferentes princípios de aplicações para serem praticados e demonstrados como pesquisa de aplicação. Para a indústria, este trabalho demonstra a capacidade e potencialidade no método de desenvolvimento do algoritmo, o qual, determina a prognose de falhas nos níveis qualitativo e quantitativo.

Os trabalhos futuros oriundos das informações desta pesquisa, estão ligados a análise de estabilidade; predição de comportamento utilizando a análise de elementos finitos; análise de comportamento com aplicações de métodos de perturbações; análise e detecção de falhas utilizando métodos de algoritmo genético.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas Complexos (SISPLEXOS), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Proc. 2019 / 10515-4), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Proc. Nº 312972 / 2019-9), e ao Centro Paula Souza – CPS, pelo incentivo e desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Bangash, M. Y. H. (2011). Earthquake resistant buildings: dynamic analyses, numerical, computations, codified methods, case studies and examples. London. Springer-verlag. 739p.

Beards, C. F. (1996). *Structural vibration: analysis and damping*. New York. Halsted press. 287p.

Bradley, D. W., & Tyrrell, A. M. (2002). In: *Immunotronics-novel finite-state-machine architectures with built-in self-test using self-nonsel self differentiation*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, New York, 6, 227-238.

Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Hoboken. Pearson education. 960p.

Daniele, V. G., & Zich, R. S. (2014). *The wiener-hopf method in electromagnetics*. Edison. Scitech publishing. 386p.

Dasgupta, D., & Niño, L. F. (2009). *Immunological computation: theory and applications*. Boca Raton. Taylor & francis group. 298p.

De Castro, L. N. (2007). *Fundamentals of natural computing: basic concepts, algorithms, and applications*. Boca Raton. CRC press. 674p.

Forrest, S., Perelson, A. S., Allen, L., & Cherukuri, R. (1994). Self-nonsel self discrimination in a computer. In: *Proc. of the IEEE symposium on research in security and privacy*. Oakland. p. 202-212. DOI: 10.1109/risp.1994.296580.

James, F. (2008). *Statistical methods in experimental physics*. Singapore. World scientific publishing. 362p.

Kailath, T. (1981). *Lectures on wiener and kalman filtering*. Wien. Springer-Verlag. 189p.

Khan, M. A., Akthar, K., Ahmad, N., Shah, F., & Khattak, N. (2020). Vibration analysis of damaged and undamaged steel structure systems: cantilever column and frame. *Earthquake engineering and engineering vibration*. 19(3), 725-737. DOI:10.1007/s11803-020-0591-9.

Kuo, H.L.(1980). A more generalized wiener filtering technique. IFAC proceedings volumes. 13(11), 539-542.

Lalanne, C. (2002). Mechanical vibration and shock: randon vibration (v.iii). London. Hermes penton science. 365p.

Mashayekhi, M., Estekanchi, H. E., & Vafai, H. (2020). A method for matching response spectra of endurance time excitations via the fourier transform. Earthquake engineering and engineering vibration. 19(3), 637-648. DOI:10.1007/s11803-020-0586-6.

Okamoto, S. (1984). Introduction to earthquake engineering. Tokyo. University of tokyo press. 640p.

Poularikas, A. D., & Ramadan, Z. M. (2006). Adaptive filtering primer with matlab. Boca Raton. CRC press. 202p.

Rajasekaran, S. (2009). Structural dynamics of earthquake engineering: theory and application using mathematica and matlab. Boca Raton. Woodhead publishing. 902p.

Tan, Y. (2016). Anti-spam techniques based on artificial immune system. Boca Raton. CRC press. 264p.

Wolstenholme, L. C. Reliability modelling: a statistical approach, boca raton, chapman & hall, 1999. 273p.

Zheng, Z., Yufeng, G., Zhang, F., Jian, S., & Degao, Z. (2020). Effects of soil dynamic response on post-earthquake deformation of slopes based on nested newmark model. Earthquake engineering and engineering vibration. 19(3), 573-582. DOI:10.1007/s11803-020-0581-y.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Dayene Kaori Shiino – 20%

Roberto Outa – 20%

Fabio Roberto Chavarette – 20%

Aparecido Carlos Gonçalves – 20%

Lucas Henrique dos Santos – 20%