



ANÁLISE DINÂMICA DE UMA VIGA EXCITADA PELO CARREGAMENTO RANDÔMICO DO VENTO

Giovanni César Nassar de Rossi, giovannirossi@alunos.utfpr.edu.br¹

Iago Maran Machado, iagomachado@alunos.utfpr.edu.br¹

Adailton Silva Borges, adailton@professores.utfpr.edu.br¹

Andreia Aoyagui Nascimento, aanascimento@ufg.br²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Alberto Carazzai, 1640 - Centro, Cornélio Procópio-PR, 86300-000

²Universidade Federal de Goiás (UFG), Avenida Esperança s/n, Câmpus Samambaia, Goiânia – GO, 74690-900

Resumo. O presente projeto tem por objetivo simular o carregamento aleatório do vento em estruturas imersas, podendo ser utilizado para uma análise de desempenho e integridade dos sistemas estruturais de um aerogerador. Para tal, utilizou-se uma viga de comportamento linear modelada a partir da teoria de vigas de Euler-Bernoulli. Assim, gerou-se a densidade espectral, utilizando o Método de Kaimal, para o desenvolvimento da velocidade do vento. E, posteriormente calculou-se a força de arrasto que este exerce quando em contato com a viga, possibilitando observar seu comportamento dinâmico. Por fim, os valores encontrados com a utilização do software ANSYS APDL foram confrontados com metodologia desenvolvida no presente trabalho. E foram gerados os auto espectros da resposta estrutural a fim de evidenciar o range de frequência excitada pela força proposta.

Palavras chave: Euler-Bernoulli, Kaimal, Análise Modal

Abstract. This project aims to simulate random wind loading in immersed structures, which can be used for a performance and integrity analysis of the structural systems of a wind turbine. For this, a beam with linear behavior modeled from the theory of Euler-Bernoulli beams was used. Thus, the spectral density was generated, using the Kaimal Method, for the development of wind speed. And, later, the drag force that it exerts when in contact with the beam was calculated, making it possible to observe its dynamic behavior. Finally, the values found using the ANSYS APDL software were compared with the methodology developed in this work. And the auto-spectra of the structural response were generated in order to show the frequency range excited by the proposed force.

Keywords: Euler-Bernoulli, Kaimal, Modal Analysis

1. INTRODUÇÃO

As demandas do mercado atualmente têm exigido máquinas e equipamentos cada vez mais elaborados, com capacidade de produção e de desempenho cada vez maiores e custos mais acessíveis. Neste contexto, o interesse pelo estudo e desenvolvimento de modelos e técnicas de identificação de parâmetros mais eficientes e que possam ser utilizados para uma análise de desempenho e integridade dos sistemas estruturais vêm aumentando rapidamente. Isso tem exigido das empresas um maior investimento em técnicas de análise, no desenvolvimento, e elaboração de modelos mais refinados utilizados para estudar e prever o comportamento dos sistemas mecânicos, principalmente quando se trata de questões ligadas à segurança e ao meio ambiente. Neste cenário, cada vez mais são utilizadas técnicas de modelagem mais sofisticadas que envolvem a análise de um maior número de detalhes sempre buscando definir modelos capazes de representar adequadamente não só comportamento estático do sistema físico, mas também o seu comportamento dinâmico estrutural.

No âmbito da mecânica computacional há diversas pesquisas que buscam propor métodos eficientes para análises dinâmicas em estruturas por meio do método de elementos finitos com o intuito de observar as respostas e estudar os estados de excitação da estrutura.

Assim, no presente artigo será desenvolvido uma metodologia para simular o carregamento aleatório do vento em estruturas imersas com base no método de Kaimal. Destaca-se que, este método tem sido utilizado na literatura para alimentar modelos de elementos finitos de torres eólicas, conforme demonstrado por Guo et al. (2021), entre outros.

Estes modelos empíricos têm sido utilizados para simplificar as forças produzidas pelo escoamento. Entretanto, os autores ressaltam que a análise da dinâmica computacional dos fluidos apresentam resultados mais precisos, a custo de um esforço computacional maior, e ainda que os modelos empíricos representam um forte aliado no dimensionamento estrutural, mesmo sendo mais simplificados.

Desta forma, no presente trabalho será modelada uma viga com base na teoria linear de Euler-Bernoulli, cuja excitação será realizada a partir das forças empíricas obtidas pelo carregamento do vento. Espera-se que devido a aleatoriedade desses carregamentos, que possa ser visualizado na resposta dinâmica estrutural as primeiras frequências naturais. E, os resultados serão comparados com os obtidos utilizando o software comercial Ansys.

2. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Nesse tópico serão apresentados as principais teorias e métodos utilizados para o cálculo da força do vento. Nele há uma breve explicação sobre o que é força de arrasto e qual o impacto desta na estrutura de uma viga. Após isto, tem-se por intuito apresentar o método de Kaimal, demonstrando a sua função em meio ao cálculo da força do vento. Ressalta-se que os autores suprimiram intencionalmente a modelagem por elementos finitos de uma viga Euler-Bernoulli, entretanto, maiores informações podem ser encontradas em Bathe (2007).

2.1. Força de arrasto

A princípio faz-se necessário compreender o que é a força de arrasto, uma vez que esta é a força carregada em uma estrutura através do vento. Sendo definida por ser uma força que faz resistência em um corpo sólido, gerando um vetor na direção e sentido da velocidade relativa entre escoamento do fluido e o corpo, sendo esta força, contrária ao deslocamento do corpo. Para a estrutura em questão, a força de arrasto será na direção e sentido da velocidade do vento na viga, e depende diretamente da área do corpo transversal desta, sendo possível visualizar um exemplo do que foi exposto na Fig. 1.

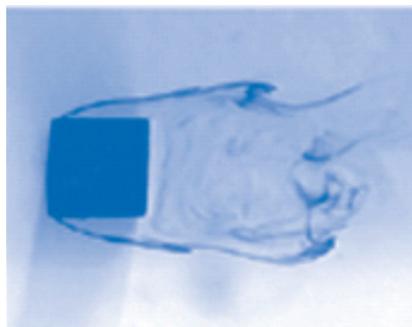


Figura 1. Objeto com alto coeficiente de arrasto (Fox et al., 2010).

Como demonstrado acima, é possível observar um objeto com alto coeficiente de arrasto, o que ocorre devido à sua área transversal e formato de sólido, não sendo favoráveis aerodinamicamente.

Para o cálculo da força de arrasto, buscou-se entender a principal equação de força do vento, esta que é dada em função do tempo, Eq.(1). A equação foi obtida através do Guo et al. (2021).

$$F(t) = \frac{1}{2} C_D \rho_{air} A u^2(t) \quad (1)$$

tem-se que: C_D representa o coeficiente de arrasto; ρ_{air} a densidade do ar e A a área do corpo transversal às linhas fluidodinâmicas; já u representa a velocidade do vento, e pode ser obtida através da Eq.(2).

$$u(t) = \bar{u} + \sum_{n=1}^{N/2} \sqrt{\frac{2PSD(w_n)}{T}} \cos(w_n t - \varphi_n) \quad (2)$$

Sendo \bar{u} a velocidade média do vento para o tempo 10 minutos, N a divisão do tempo da amostra pelo *time step*, PSD a densidade espectral de potência, w_n a representação da frequência em radianos e φ_n um valor randômico entre 0 e 2π . Torna-se necessário incluir uma variável randômica, devido ao vento possuir aspecto aleatório. A Eq.(2) foi obtida por Hansen (2015).

A partir da Eq.(2), espera-se obter um resultado similar ao apresentado no material de referência, como pode ser visto na Fig. 2.

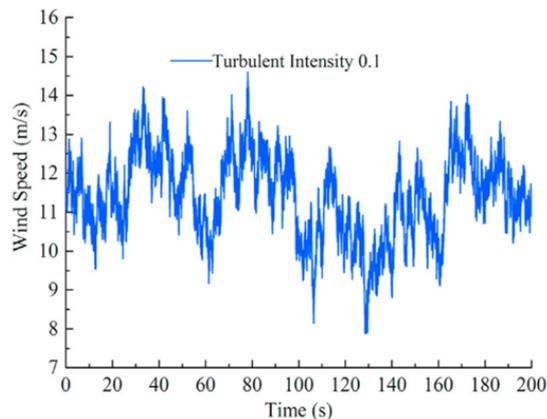


Figura 2. Histórico temporal da velocidade do vento no topo da torre (90 m) (Guo et al., 2021).

Para a implementação da força do vento desejada através da velocidade do vento, é necessário que se obtenha a densidade espectral de potência (PSD) em relação às frequências de amostragem definidas. Existem diversos tipos de espectros, variando de acordo com situações e regiões, podendo ser utilizados os espectros de Kaimal e Mann para usinas eólicas do tipo *onshore* e JONSWAP e Pierson-Moskowitz para usinas *offshore*. Além disso, a DNV e a IEC 61400 são as normas internacionais utilizadas para projetos de turbinas eólicas *offshore* e *onshore*, respectivamente. Dessa maneira, o método que será utilizado é o de Kaimal, que abrange a região e o tipo de turbina utilizada pelo artigo referência e por esta razão foi escolhido para ser empregado no presente estudo. O gráfico obtido através do método consiste em um espectro para o vento, obtido através do gráfico de densidade espectral pela amostragem de frequência. Como pode ser visto na Fig. 3, no gráfico apresentado pelo livro “*Aerodynamics of Wind Turbines*” (Hansen, 2015).

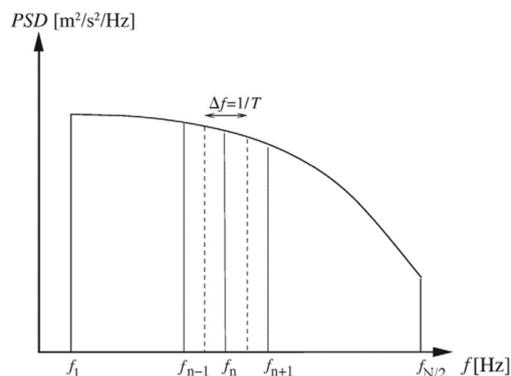


Figura 3. Gráfico PSD x Frequência (Hansen, 2015)

A partir disso, torna-se possível calcular a velocidade do vento para um ponto no espaço, uma vez que estes valores são necessários para o seu cálculo e, posteriormente, para a força de arrasto imposta na estrutura. É importante ressaltar que a utilização das variáveis principais (frequência e PSD), apresentadas no gráfico, em função logarítmica permite uma melhor visualização, facilitando a análise do que está sendo exposto. Diante disso, utiliza-se normalmente a equação abaixo para a obtenção da densidade espectral.

$$PSD(f) = \frac{I^2 \bar{u} l}{\left(1 + 1.5 \frac{f(t)l}{u}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (3)$$

Para a Eq.(3), tem-se que a variável I representa a intensidade da turbulência, l representa o escalar, sendo equivalente a 20 vezes a altura da viga estudada (representada por h) para uma altura inferior a 30 metros. Caso a altura seja superior a 30 metros, l é igual a 600. Por fim, tem-se que f é utilizada para representar a frequência do vento e varia em função do tempo. A Eq.(3) foi apresentada por Hansen (2015).

3. RESULTADOS

Na primeira seção será implementada a sub rotina para a obtenção da força aleatória do vento, utilizando o método de Kaimal. Posteriormente, será implementada por meio do método discreto de elementos finitos uma viga de Euler-Bernoulli engastada livre. Em um primeiro momento suas frequências naturais serão comparadas com as obtidas no software comercial Ansys.

E, finalmente, na última seção, a força de excitação do vento será utilizada para excitar o último nó da estrutura implementada.

3.1. Cálculo da força do vento

Partindo da Eq. (3) tem-se que, I igual 0,1, \bar{u} igual a 11,4 m/s e l é igual a 30. Além disso, f possui banda de frequência de 0 a 25 Hz, e incrementos(Δf) de 0,005 Hz. Já que considerou-se um time step (t) igual a 0,02 segundos com uma duração de 200 segundos (T), de forma análoga à Guo et al. (2021). Assim a PSD resultante, Fig. 5 se assemelha a Fig. 3 obtida por esses mesmos autores.

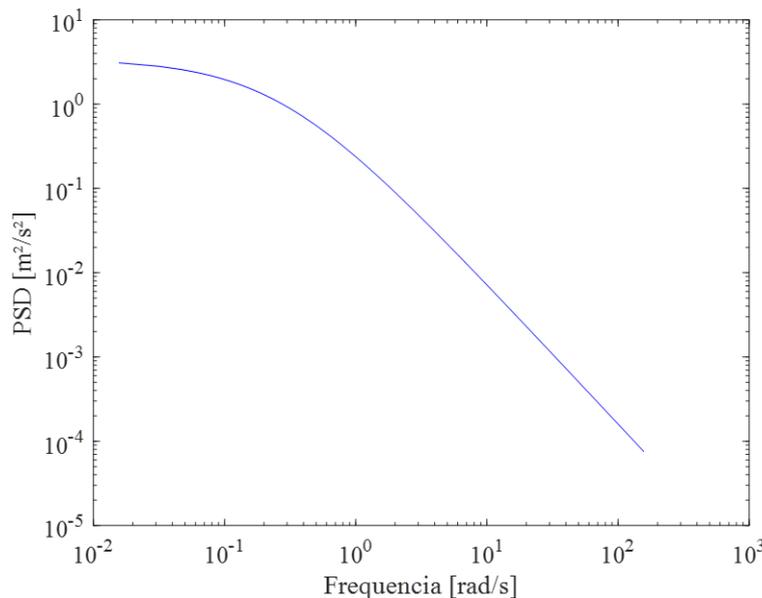


Figura 5. Gráfico PSD x Frequência (Autoria própria, 2022)

Tendo em vista que o gráfico da PSD esteve de acordo com o desejado, ou seja, foi similar ao gráfico obtido na bibliografia utilizada como base, seguiu-se com o projeto.

Assim, de posse da PSD obtém-se a velocidade do vento $u(t)$, considerando-se a variável φ_n como sendo um valor randômico entre 0 e 2π , Fig. 6(a).

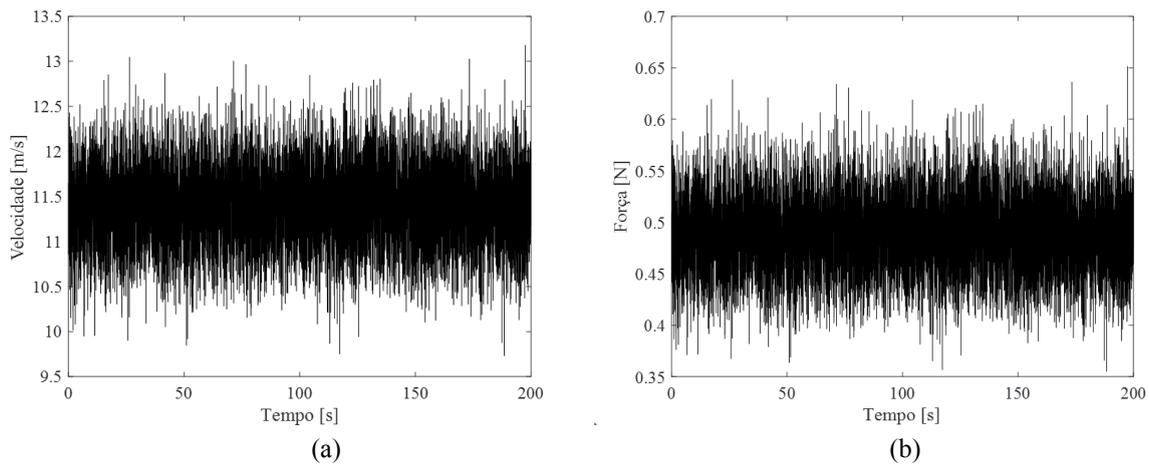


Figura 6. Gráfico velocidade ($u(t)$) e Força ($F(t)$), (a) e (b), respectivamente.

Observa-se na Fig. 6(a) que a velocidade de vento, como era de se esperar, apresenta uma forma aleatória devido a variável φ_n .

Finalmente, utilizando a Eq. (1), e definindo as variáveis C_D igual a 2, ρ_{air} igual a $1,25 \text{ kg/m}^3$ e A igual a $0,003 \text{ m}^2$, pode-se obter a força de arrasto, Fig. 6(b). Destaca-se que este carregamento será utilizado para excitar a viga a ser implementada.

Ainda, para verificar a presença de componentes de forças na faixa de frequência de interesse, aplicou-se nos dados dispostos na Fig. 6(b) a transformada rápida de Fourier (FFT), Fig.7.

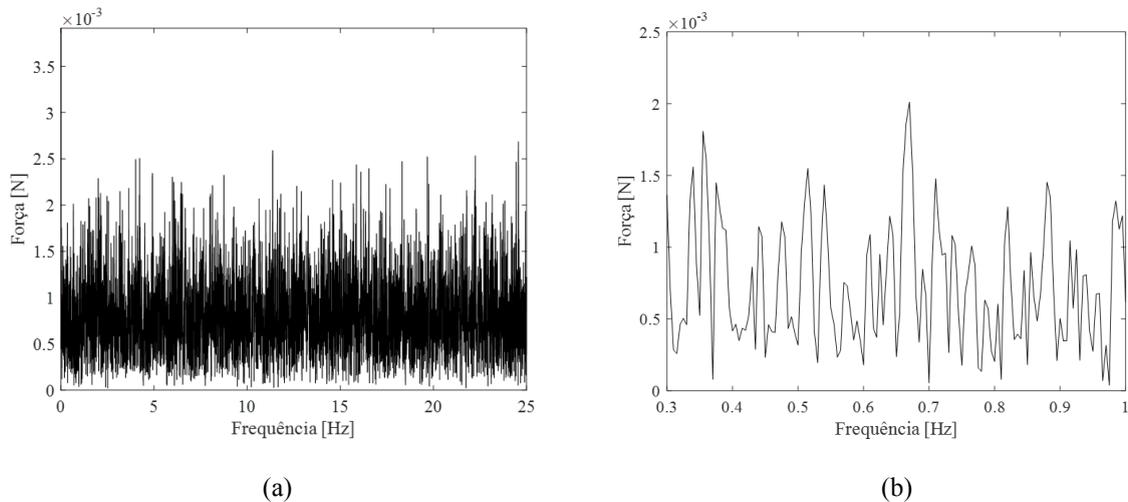


Figura 7. Gráficos FFT da Força do vento x Frequência. (a) sem zoom, (b) com zoom, próximo à frequência de interesse (Autoria própria, 2022)

Com o intuito de melhorar a visualização dos dados obtidos nas figuras acima, aplicou-se a escala logarítmica no eixo y do gráfico, ou seja, aplicou-se a escala logarítmica na força do vento. Sendo assim, obteve-se os gráficos abaixo.

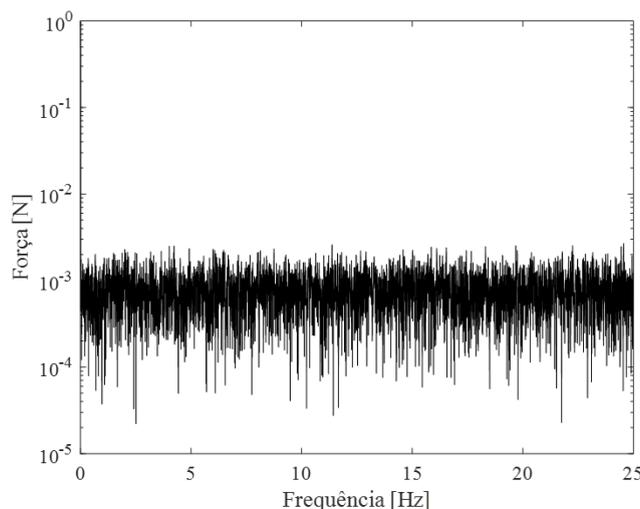


Figura 8. Gráfico FFT da Força do vento em função logarítmica x Frequência (Autoria própria, 2022)

A partir da Fig. 8, é possível notar que a utilização da escala logarítmica possibilitou uma visualização completa dos dados, demonstrando que houve uma maior concentração de força em baixas frequências, intervalo de 0 a 5 hertz. Entretanto, observa-se ainda que toda a faixa de frequência foi excitada, mesmo que por valores pequenos.

Assim os resultados se mostraram satisfatórios, e portanto, deu-se início a próxima etapa para excitar uma viga engastada livre com o dados da Fig. 6(b).

3.2. Modelagem e análise modal

Nesta etapa foi implementado uma viga engastada livre cujas propriedades são apresentadas na Tabela 1. Ressalta-se que as dimensões foram intencionalmente delimitadas para que as primeiras frequências naturais se apresentassem na faixa de 0 a 25 Hz.. O modelo foi confeccionado tanto na subrotina, em Matlab, desenvolvida pelos autores, quanto utilizando o software comercial ANSYS. Para este último, utilizou-se um elemento de viga do tipo BEAM188. Ademais, ambos foram implementados com 20 elementos de viga de Euler-Bernoulli igualmente espaçados.

Vale ressaltar que, os autores Guo et al. (2021) optaram por implementar uma torre cilíndrica, que possui as frequências naturais de flexão idênticas, devido simetrias dos momentos geométricos de inércia para um plano traçado no centro geométrico da seção transversal. Entretanto, os presentes autores optaram por utilizar uma viga retangular, Fig. (9), neste primeiro momento, pois além de possuir frequências diferentes, possibilita, devido a sua simplicidade, verificar com maior acuracidade a influência da força aplicada.

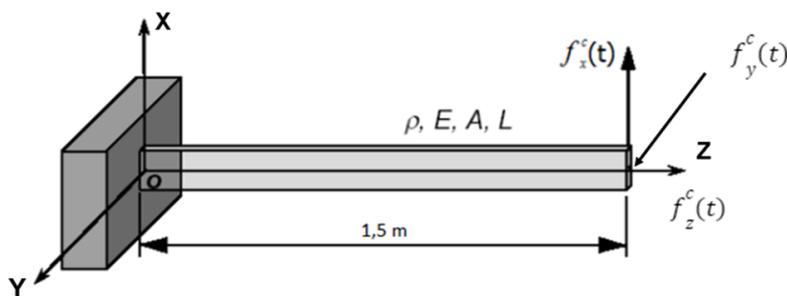


Figura 9. Estrutura utilizada para simulação. Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 1. Dados para modelagem da viga (Autoria própria, 2023)

Propriedade	Valor	Unidade
Base	1,3	mm
Altura	2,0	mm
Comprimento	1500	mm
Módulo de elasticidade	200	GPa
Coefficiente de Poisson	0,33	-
Densidade	7850	Kg/m ³

Na Fig. 9 observa a forma modal da primeira frequência da viga.

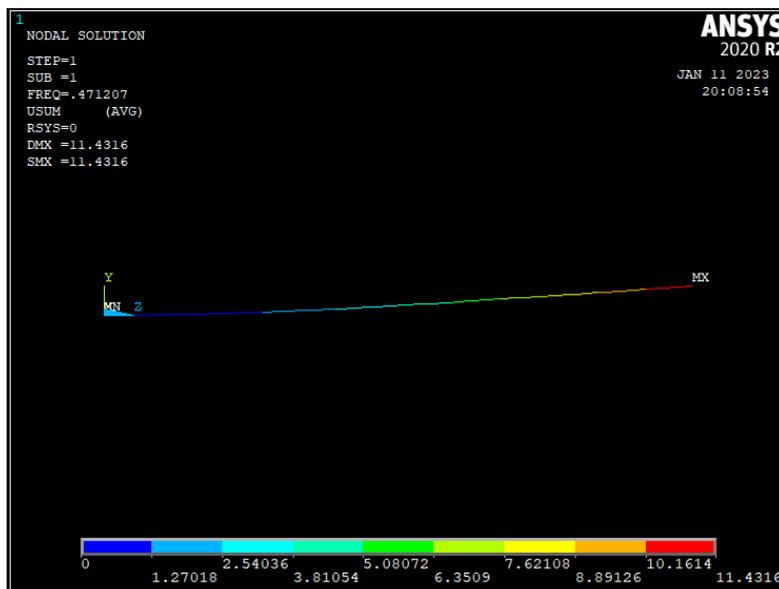


Figura 10. Simulação dos modos de vibrar. Primeiro modo no eixo y (Autoria própria, 2023)

A Tabela 2, mostra a comparação dos resultados obtidos com as sub rotinas implementadas no presente trabalho em comparação com o software comercial Ansys.

Tabela 2. Comparação entre as frequências naturais obtidas através de diferentes softwares (Autoria própria, 2023)

Modo	Frequência [Hz]		
	presente (autor)	Ansys APDL (20 elementos)	Erro máximo
1	0,4711	0,4712	0,02%

Devido à frequência obtida possuir erro máximo de 0,82%, foi possível dar início a última etapa do projeto, que seria implementar a força gerada na viga modelada.

3.3. Modelo excitado pela força do vento

Nesta seção aplica-se a força gerada no item 3.1, na direção y do último nó da viga engastada livre do modelo implementado no presente trabalho, Fig.9.

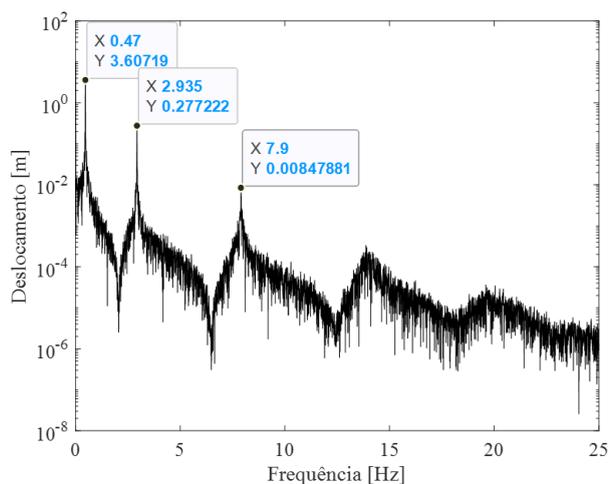


Figura 11. Frequências naturais excitadas pela força do vento na direção y .

Observa-se na Fig. 11 que a excitação aleatória do vento foi capaz de excitar as 4 primeiras frequências naturais da viga na direção y . Nota-se ainda, que a primeira frequência está de acordo com as obtidas na seção 3.2, pelos presentes autores e pelo software comercial Ansys, com erro aproximado de 0.25%.

Vale ressaltar que foi aplicada uma carga concentrada para evidenciar o comportamento estrutural quando excitado por uma carga empírica do vento, utilizando o método de Kaimal. Ressalta-se ainda que, as cargas devido ao vento, devem ser distribuídas ao longo do comprimento da viga, cuja área o vento incide. Entretanto, neste primeiro trabalho, os autores optaram por fazer uma simplificação, de forma a avaliar melhor a resposta estrutural.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi apresentada uma metodologia empírica para o cálculo das forças devido ao vento em estruturas imersas. Por meio do carregamento de uma viga engastada livre, observou-se que esta foi capaz de excitar as frequências naturais da estrutura, na banda de frequência utilizada. Evidenciando assim, que as sub-rotinas de obtenção da forças apresentaram resultados satisfatórios.

Destaca-se que nas próximas implementações serão utilizados, para a estrutura imersa, os dados de uma torre eólica encontrada na literatura, e as forças serão distribuídas ao longo do comprimento de acordo com a altura da torre.

5. AGRADECIMENTOS

À instituição FURNAS Centrais elétricas e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da ANEEL pelo apoio financeiro. E a Universidade Tecnologia Federal do Paraná (UTFPR), campus de Cornélio Procópio.

6. REFERÊNCIAS

- BATHE, K.J. “Finite Elements Procedures”. Klaus-Jürgen Bathe, 2006.
FOX, R. W.; MCDONALD A. T.; PRITCHARD P. J. “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 8ª Edição; LTC Editora, 2014.
GUO, S.; LI Y.; CHEN, W. “Analysis on dynamic interaction between flexible bodies of large-sized wind turbine and its response to random wind loads”. Renewable energy 163, p. 123-137, 2021.
HANSEN, M. O. L. “Aerodynamics of Wind Turbines”, 3 a Edição; Earthscan from Routledge, 2015.
KWON, Y. W.; BANG, H. “The Finite Element Method Using MATLAB”. 2 a Edição, Press CRC, 2018.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.