

## INVESTIGAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UMA TORRE EÓLICA DEVIDO À AÇÃO DO VENTO CONSIDERANDO MODELOS DISCRETOS SIMPLIFICADOS

Vinicius Coutinho da Silva, [viniciuscoutinho04@gmail.com](mailto:viniciuscoutinho04@gmail.com)<sup>1</sup>

Guilherme Blanck Araújo, [guilhermeblanck@gmail.com](mailto:guilhermeblanck@gmail.com)<sup>2</sup>

Aline Souza de Paula, [alinedepaula@unb.br](mailto:alinedepaula@unb.br)<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, 70.910 – 900, Brasília, DF

**Resumo.** A torre eólica é uma estrutura construída para um longo prazo de operação. Nesse sentido, a investigação da resposta dinâmica proporciona meios para garantir um melhor desempenho e a integridade do equipamento. Assim, este trabalho propõe uma análise do comportamento dinâmico da torre eólica centrada no domínio da frequência, partindo da utilização de modelos simplificados que representam o comportamento dinâmico da torre e de uma análise estatística do comportamento do vento para gerar os sinais de forçamento. Dois modelos discretos baseados em duas torres distintas foram estudados nesse artigo, um idealizado com 1 GDL e um produzido pelo método dos elementos finitos no software Ansys. Os sinais de força foram obtidos a partir da distribuição de Weibull, com os valores mais prováveis da distribuição sendo calculados para a altura das torres por uma modelagem logarítmica da camada limite atmosférica e a aplicação da densidade espectral de Kaimal, simulando a turbulência. Após a aplicação do sinal de força, foram obtidas as respostas em frequência para os sistemas de interesse. Observou-se uma resposta semelhante à encontrada na literatura para a primeira torre e foram estabelecidas condições em que o modelo de 1 GDL é representativo e situações em que o modelo discreto se faz necessário.

**Palavras chave:** Torre eólica, resposta dinâmica, domínio da frequência, modelos discretos.

**Abstract.** A wind turbine tower is a structure built for a long-term operation. In this way, the investigation of the dynamic response gives ways to ensure a better performance and equipment integrity. Therefore, this work proposes a dynamic behavior analysis of the wind tower focused on the frequency domain. Two representative simplified models for the wind tower are considered and a statistical wind analysis to generate force signals is used. Two discrete models based in two different towers were studied, one idealized as 1 DOF and one created by FEM on Ansys software. Force signals were obtained from Weibull distribution and calculated for the tower height using a logarithmic model for the atmospheric boundary layer. Also, Kaimal's power spectral density was used to simulate turbulence. After finding the loads, it was possible to find the frequency response. Values similar to the literature were found for the first tower and were established conditions in which the 1 DOF can be used and situations in which the discrete model is necessary.

**Keywords:** Wind turbine, dynamic response, frequency domain, discrete models.

### 1. INTRODUÇÃO

A produção de energia eólica no Brasil e no mundo vem crescendo a cada ano, e isso se dá principalmente pela necessidade de redução da dependência de fontes não renováveis como o petróleo e o carvão mineral. Conforme o relatório do Global Wind Energy Council, há a possibilidade de que até 2030 a energia gerada pelos ventos abasteça 20% da eletricidade mundial. Até esse momento, haverá uma redução nas emissões de carbono em cerca de 3 bilhões de toneladas por ano (GWEC, 2016).

No âmbito econômico, a instalação de uma turbina eólica demanda um custo inicial próximo de 1,3 milhão por MW de capacidade de produção de energia (Blewett, 2021). Assim, a estrutura deve ser projetada para um longo tempo de operação e que seja capaz de suportar as variações de cargas geradas pela força dos ventos. Diante disso, e sabendo também que o projeto de torres eólicas contempla principalmente a resistência à fadiga (Liu, *et al.*, 2020), a investigação da resposta dinâmica devido à ação dos ventos é fundamental para assegurar a integridade da construção.

Neste trabalho, conduz-se uma análise da resposta dinâmica no domínio da frequência de um modelo simplificado com 1 grau de liberdade (GDL) para duas torres distintas, representando o conjunto de torre e nacelle, e de um modelo discreto construído no ANSYS para uma das torres. O modelo utilizado para determinar o sinal de força a partir dos ventos parte da distribuição de Weibull para determinar valores de velocidade média mais prováveis e esses valores são estendidos para a altura da torre por meio de um perfil de velocidades logarítmico da camada limite atmosférica. Além de calcular a velocidade média, é necessário saber como ocorre a variação nos valores em torno dessa média, ou seja, simular a turbulência, e para isso foi utilizada a densidade espectral de Kaimal, conforme demonstrado por Alkmim *et al.* (2018). A partir dos resultados, observa-se uma resposta semelhante à encontrada na literatura para a primeira torre (Alkmim *et al.*, 2018). Além disso, são estabelecidas condições em que o modelo de 1 GDL é representativo e situações em que o modelo discreto se faz necessário.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Modelagem

A torre eólica pode ser modelada como uma viga em balanço com um ponto de concentração de massa porque a maior parte de sua massa está concentrada no topo. A forma comum de representar a rigidez equivalente da torre obtida por uma massa concentrada no topo com uma distribuição de massa negligenciável  $k_{eq} = 3EI/L^3$  não é representativa no caso de uma turbina eólica. Dessa maneira, faremos a modelagem da torre utilizando o princípio do trabalho virtual para obter os parâmetros de rigidez e massa equivalentes, tal como especificado por Alkmim (2017) e mostrado na Fig. 1. Utilizando uma viga de Euler-Bernoulli na qual está sujeita a um carregamento por unidade de área  $F(z, t)$ , seu movimento é descrito por:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( EI \frac{\partial^2 w(z,t)}{\partial z^2} \right) + m \frac{\partial^2 w(z,t)}{\partial t^2} = F(z, t) \quad (1)$$

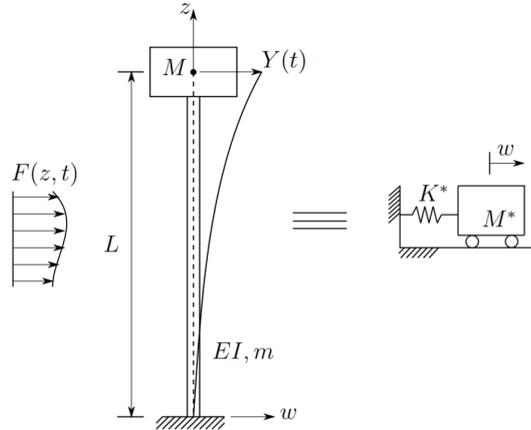


Figura 1. Modelo esquemático da estrutura e modelo simplificado equivalente (Alkmim, 2017)

Em que  $w(z, t)$  é o deslocamento transversal,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $I$  é o momento de inércia médio no comprimento  $L$ . O problema homogêneo, no qual  $F(z, t) = 0$  tem um número infinito de soluções, ou seja, infinitas frequências naturais (relacionadas com os autovalores) associadas a infinitos modos de vibração (autovetores). Considerando a separação de variáveis  $w(z, t) = \phi(z)Y(t)$ , a equação do movimento com relação à altura é dada por:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left( EI \frac{d^2 \phi(z)}{dz^2} \right) + m w_n^2 = 0 \quad (2)$$

Para resolver a Eq. (2), quatro condições de contorno devem ser satisfeitas, sendo a base fixa em  $z = 0$ , dada pela Eq. (3) e  $z = L$  na extremidade livre, dada pelas Eq. (4) e Eq. (5):

$$\phi(0) = 0, \quad \frac{d\phi(x)}{dz} = 0 \quad (3)$$

$$EI \frac{d^2 \phi(L)}{dz^2} = w_n^2 \frac{d\phi(L)}{dz} J \quad (4)$$

$$EI \frac{d^3 \phi(L)}{dz^3} = w_n^2 \phi(L) M \quad (5)$$

Em que  $J$  é o momento de inércia de rotação da massa,  $M$  é a massa na ponta e  $w_n$  são as frequências naturais. Então aplicando as condições de contorno e resolvendo o problema de autovalor, encontramos:

$$K^* = \frac{\pi^4}{32L^3} EI \quad (6)$$

$$M^* = \frac{ML}{2\pi} \left[ \pi \left( 3 + 2 \frac{M}{mL} \right) - 8 \right] \quad (7)$$

Em posse de meios para calcular a massa e rigidez equivalentes, podemos definir os parâmetros a serem utilizados no modelo de 1 GDL a partir das informações de duas torres distintas, como foi feito por Araújo (2021), a primeira sendo baseada nos parâmetros definidos por Alkmim (2017) e a segunda, um modelo da torre Repower MM82. Os resultados são apresentados na Tab. 1:

	Torre 1	Torre 2	Unidades
Massa equivalente	34.975	127.230	kg
Rigidez equivalente	470.685	569.850	N/m
Razão de amortecimento	1,83	1,83	%

Tabela 1. Parâmetros utilizados no modelo de 1 GDL para as duas torres

Devido à natureza estocástica do forçamento, a resposta do sistema é definida a partir da Eq. 10, usando o sinal de força  $F(\omega)$  e da função de transferência  $H(\omega)$  em que  $M^*$  é a massa equivalente,  $C^*$  é o amortecimento equivalente,  $K^*$  é a rigidez equivalente. (Alkmim, 2017):

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (8)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{-M^*\omega^2 + iC^*\omega + K^*} \quad (9)$$

$$S_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega); S_{xx}(\omega) = F(\omega) \quad (10)$$

## 2.2. Força dos ventos

Para caracterizar os sinais de força, é necessário conhecer como os ventos variam em torno de uma média e, a fim disso, foi escolhida como distribuição aleatória a distribuição de Weibull, recomendada pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) na norma internacional 61 400-1. Na distribuição de Weibull, são necessários dois coeficientes,  $c$  e  $k$ , sendo eles determinados por dados meteorológicos. Assim, foi escolhido 3,94 e 2,81 para  $c$  e  $k$ , respectivamente, tal como os valores encontrados por Ozawa (2017) pelo método dos mínimos quadrados para a cidade de Ventania no Paraná, com média de 3,51 m/s. A Figura 2 mostra o gráfico da função com os parâmetros escolhidos:

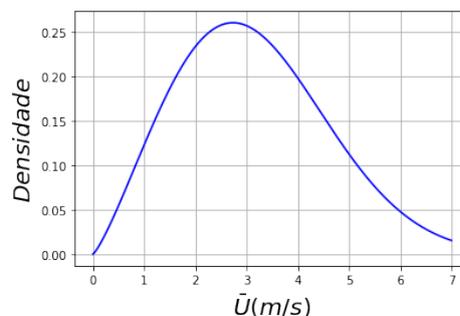


Figura 2. Distribuição de Weibull calculada na altura de medição

Ozawa (2017) estimou sua distribuição para uma altura de medição de 10 m, desse modo, o conceito da camada limite atmosférica foi utilizado para estender esse modelo para a altura correspondente das torres. Dois modelos foram

considerados, um modelo logarítmico e um de potência, com os valores adotados para gerar a distribuição equivalentes à rugosidade da terra arável (Hernandez-Estrada, et al., 2001). Com base nos dois modelos, foi gerada uma função de distribuição acumulada inversa que permitirá a escolha de valores mais prováveis de medição. A Figura 3 mostra essa função calculada para a altura das torres, 60 m no caso da torre 1 e 76,15 m no caso da torre 2.

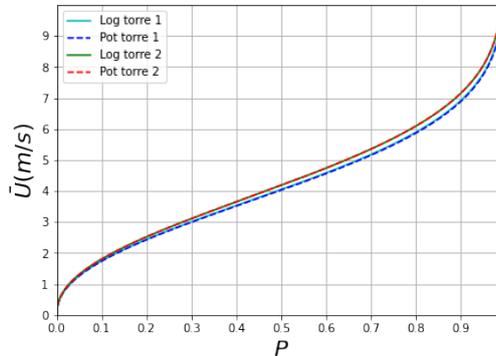


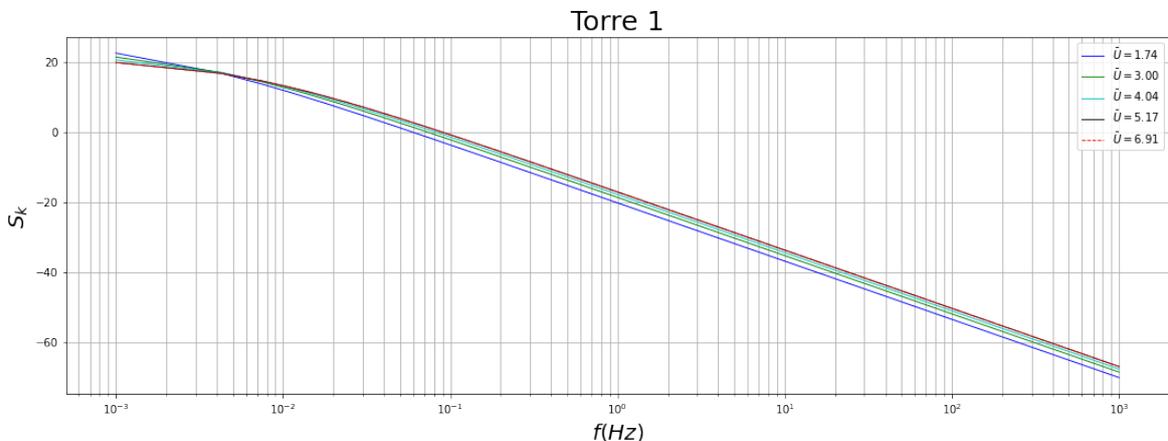
Figura 3. Função de distribuição acumulada inversa calculada para a altura das torres

Pelo gráfico, pode ser notado que os dois modelos apresentam comportamentos semelhantes no que diz respeito a variação das velocidades. Desta forma, neste trabalho considera-se apenas o modelo logarítmico. Baseado nesse modelo, é gerada a densidade espectral, ou *power spectral density* (PSD) de Kaimal, usada para simular o fenômeno da turbulência, de forma a obter o sinal de força na frequência. Cinco valores de velocidade foram utilizados para produzir a PSD e eles estão apresentados na Tab. 2:

Probabilidade acumulada	$\bar{U}$ Torre 1 (m/s)	$\bar{U}$ Torre 2 (m/s)
0,1	1,7	1,8
0,3	3,0	3,1
0,5	4,0	4,2
0,7	5,2	5,3
0,9	6,9	7,1

Tabela 2. Velocidades médias para probabilidades acumuladas

A partir dos valores da Tab. 2 e dos padrões da Comissão Eletrotécnica Internacional (Burton, et al., 2001) é gerada a PSD em  $\frac{m^2}{s^2 Hz}$  para as duas torres:



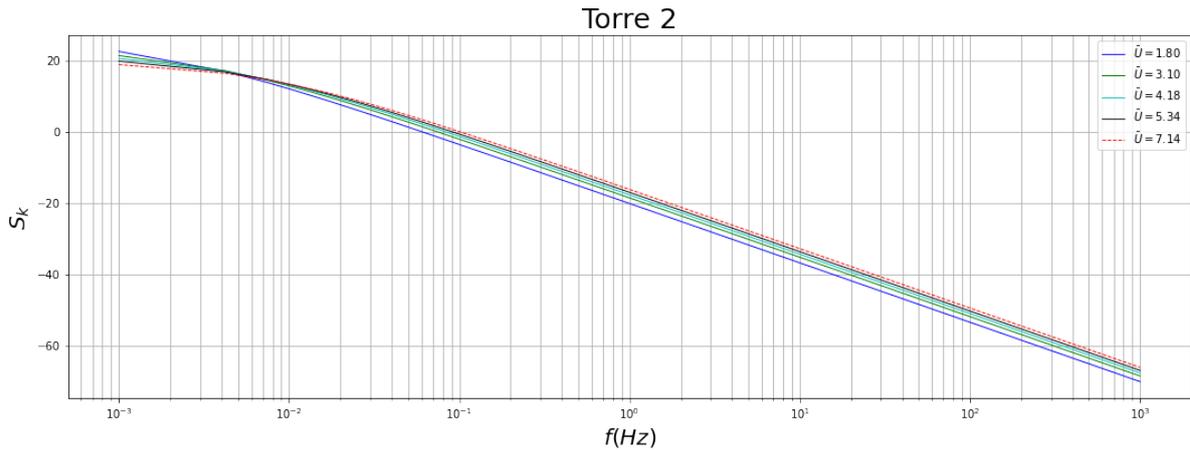


Figura 4. PSD de Kaimal para as duas torres e velocidades distintas

O sinal de força  $F(\Omega)$  utilizado na Eq. (10) é obtido da Eq. (11), a equação do arrasto, em que  $C$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área frontal da torre e  $v(\Omega)$  é a velocidade na frequência obtida a partir da PSD de Kaimal para cada torre. Dado que o foco do estudo é a investigação da resposta dinâmica devido a variação da força dos ventos no modelo, pode-se tratar o termo  $\frac{1}{2}C\rho A$  como constante e equivalente à unidade a fim de analisar apenas a influência do termo relativo à velocidade.

$$F(\Omega) = \frac{1}{2}C\rho v(\Omega)^2 A \quad (11)$$

### 3. RESULTADOS

A Figura 5 apresenta a resposta do modelo de 1 GDL das duas torres analisadas para uma probabilidade acumulada de 0.9, equivalente a uma velocidade de 6,91 m/s para a torre 1 e 7,14 m/s para a torre 2. Os resultados obtidos para a torre 1 são compatíveis como os obtidos por Alkmim *et al.* (2018).

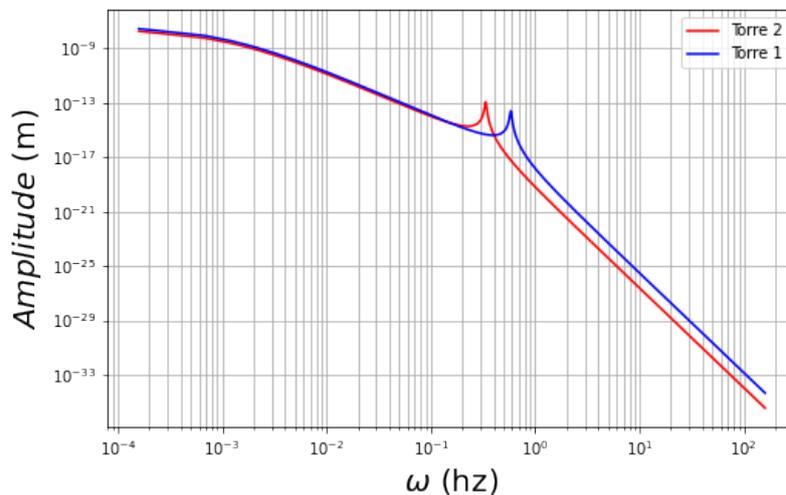


Figura 5. Resposta em frequência das duas torres analisadas

Em seguida, foram realizadas análises a partir de um modelo discreto da torre 2 com 30 GDL criado no ANSYS. Três casos diferentes de aplicação das forças dos ventos foram considerados, um aplicado apenas na extremidade livre de forma concentrada, outro com a mesma força aplicada ao longo da torre de maneira uniforme e um terceiro, utilizando o modelo logarítmico da camada limite atmosférica. A figura 6 expressa a disposição das forças em cada caso.

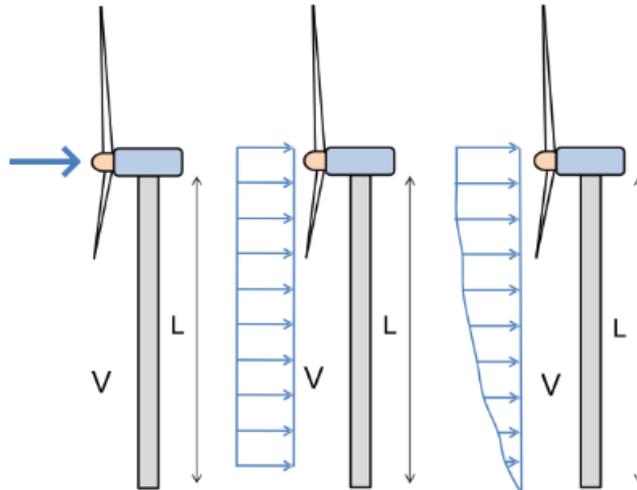


Figura 6. Casos de aplicação das forças

Definiu-se um amortecimento proporcional a matriz de rigidez  $C = cK$ , sendo  $C$  a matriz de amortecimento,  $K$  a matriz de rigidez e  $c$  uma constante. Foram analisados 6 amortecimentos distintos e duas velocidades médias diferentes, referentes a  $0,9$  e  $1 - 10^{-16}$  de probabilidade acumulada, representando uma situação possível com probabilidade considerável e outra com probabilidade reduzida. A adição de uma velocidade mais alta foi motivada por analisar situações de operação mais críticas. Os resultados apresentados se referem ao nó do topo, como apresentado na fig. 7 para o caso de forçamento distribuído e na fig. 8 para o forçamento concentrado no topo da torre.

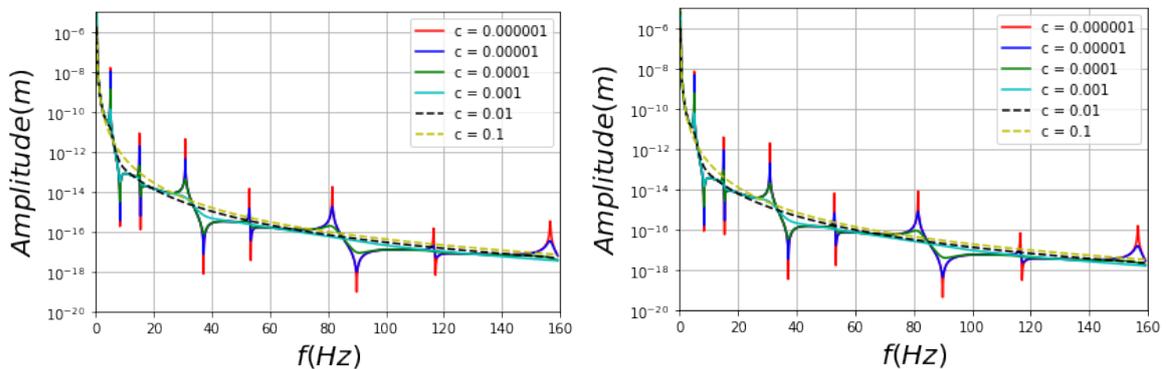


Figura 7 – Resposta para o caso distribuído, com velocidade média de 23.80 m/s e 7.14 m/s, respectivamente

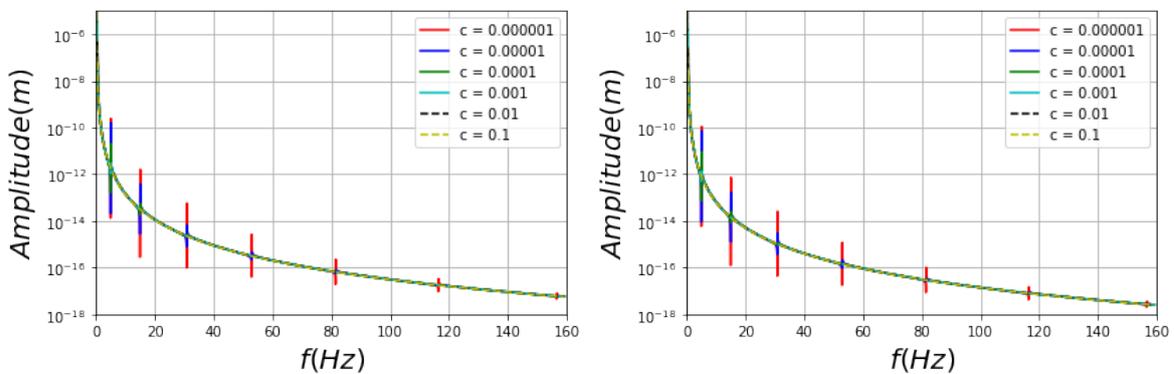


Figura 8 - Resposta para o caso concentrado, com velocidade média de 23.80 m/s e 7.14 m/s, respectivamente

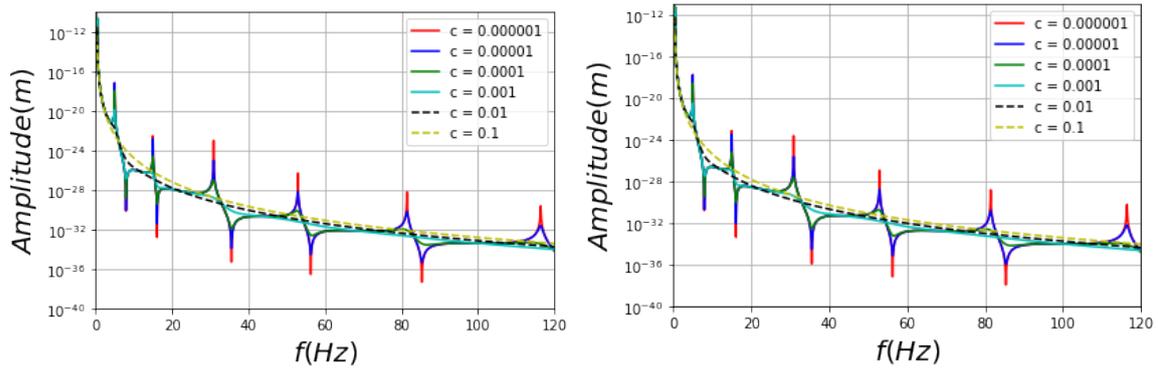


Figura 9 - Resposta para o caso logarítmico, com velocidade média de 23.80 m/s e 7.14 m/s, respectivamente

Observa-se que, nos três casos de forçamento considerados, apesar da significativa mudança de velocidade média, não há alteração apreciável na resposta. Desse modo, as próximas análises consideram uma velocidade média de 7.14 m/s. É notável a diferença nas respostas entre os casos de forçamentos concentrado, distribuído e logarítmico. Nos últimos casos, mais modos tem influência na resposta do sistema, assim como a influência de cada modo é maior. Apesar de não ser evidente, os casos distribuído e logarítmico expressam diferenças significativas, principalmente para frequências mais altas. A figura 9, a seguir, mostra uma comparação entre o resultado de 1 GDL obtido anteriormente e os casos de forçamento analisados para o sistema discreto, considerando  $c = 0.005$  para o caso concentrado e  $c = 0.03$  para o caso distribuído e logarítmico, onde pode-se verificar uma boa concordância das respostas para o primeiro modo.

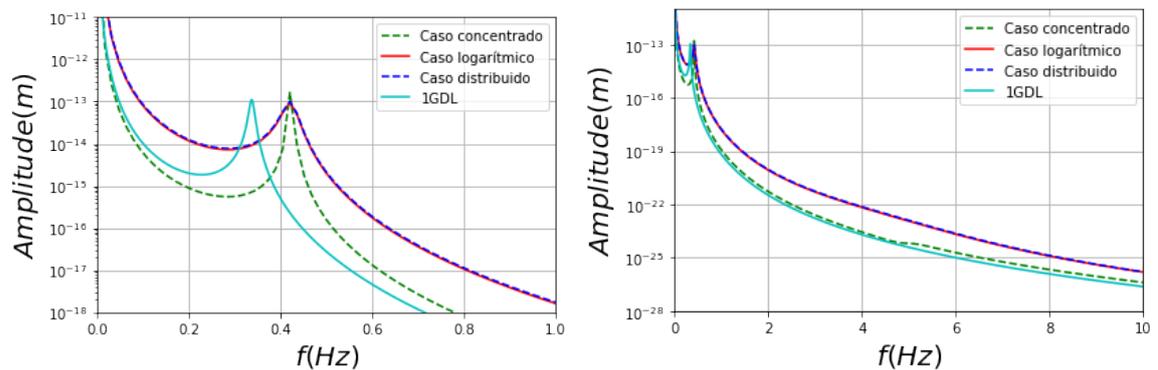


Figura 9 – Comparação entre a resposta dos 3 modelos considerados

A partir da realização de diversas simulações, observou-se que para  $c \geq 0.03$ , no caso concentrado e no caso distribuído, e  $c \geq 0.005$  no caso logarítmico, o modelo discreto  $n$  GDL apresenta apenas um pico na resposta relacionado a primeira frequência de ressonância (0.422 Hz), isso ocorre até mesmo para as velocidades mais altas. Desta forma, para esses valores de amortecimento, o modelo 1GDL é representativo para a análise da torre, atestando a validade da investigação do modelo simplificado de 1 GDL.

Com base nas matrizes de massa e rigidez e do amortecimento proporcional, a fim de minimizar os efeitos acentuados da resposta, realizou-se uma alteração na estrutura da torre adicionando um amortecedor de vibrações dinâmico (ADV). O ADV foi projetado adicionando uma massa extra no termo que representa uma massa acima da nacela da torre na matriz de massa da torre equivalente a 10% da massa total da torre eólica, e uma rigidez equivalente à massa adicionada. Como os efeitos do primeiro pico de ressonância são mais expressivos e possuem mais energia, essa foi a frequência usada para sintonizar o ADV. Os resultados estão apresentados na fig. 10, com a estrutura modificada sendo submetida aos três tipos de forçamento sem a presença de amortecimento, portanto, os efeitos dos picos se apresentam na mesma ordem de grandeza.

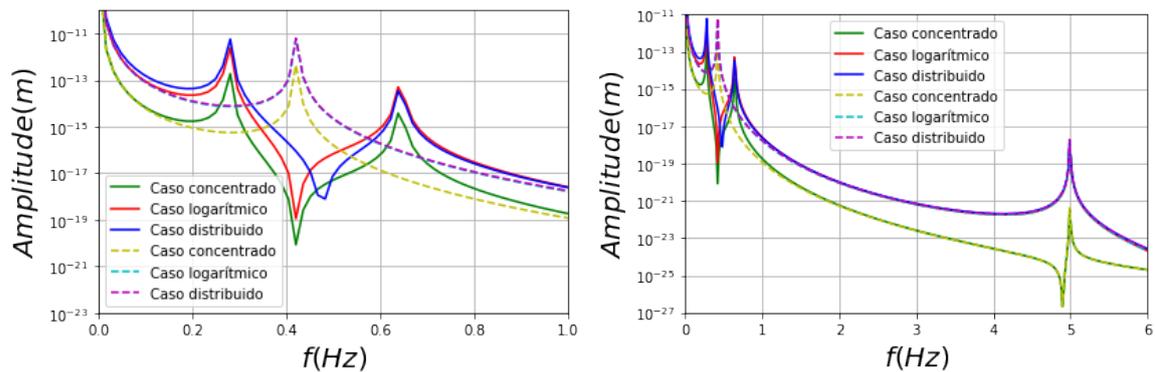


Figura 10 – Comparação entre as respostas com a presença do ADV

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise dinâmica de duas torres eólicas a partir de dois modelos distintos, sendo um de 1GDL e outro de  $n$  GDL construído no Ansys. Para o modelo 1GDL a frequência de ressonância encontrada para a torre 1 foi a mesma encontrada por Alkmin *et al.* (2018) com valores de amplitude adequados para o uso da formulação aleatória usada na aplicação da PSD de Kaimal, e para a torre 2, o valor encontrado apresentou uma diferença de cerca de 5% no valor obtido experimentalmente por Oliveira (2012). Para o caso do modelo  $n$  GDL três situações foram analisadas, uma com força concentrada na extremidade livre, com forçamento distribuído igualmente na torre e com forçamento avaliado pelo modelo logarítmico da camada limite atmosférica. Foi notável a diferença nas respostas para os casos considerados. No caso com forçamentos distribuído e logarítmico, mais modos tem influência na resposta do sistema, assim como a influência de cada modo é maior. Além disso, verificou-se que para  $c \geq 0.03$ , o modelo 1 GDL é representativo para análise dinâmica da torre eólica. Portanto, verifica-se que os resultados obtidos pelo modelo de 1 GDL podem ser representativos em determinados cenários, dependendo do amortecimento presente e forçamento imposto. Desta forma, este trabalho mostra a importância da utilização de um modelo adequado para que a análise dinâmica seja representativa do sistema real.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Alkmin, M. Numerical and Experimental Analysis of a Tuned Liquid Column Damper in a Wind Turbine Subject to Stochastic Load. 2017. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília.
- Alkmin, M. H., Fabro, A. T. e Morais, M. V. G. Optimization of a tuned liquid column damper subject to an arbitrary stochastic wind. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (online), v. 40, p. 551, 2018.
- Araújo, Guilherme Blanck. Investigação de vibração estrutural devido à ação do vento. Orientador: Profa. Dra. Aline Souza de Paula. 2021. Projeto de graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, [S. l.], 2021.
- Blewett, Dan. ‘Wind Turbine Cost: How Much? Are They Worth It in 2022?’. *Weather Guard*, 2021. Disponível em: <<https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/>>. Acesso em: 15 de fev. de 2022.
- BURTON, T. et al. *Wind Energy Handbook*. [S.l.: s.n.], 2001.
- GWEC. *Global Wind Energy Outlook 2016*. Disponível em: <[https://gwec.net/wpcontent/uploads/2020/12/GWEO\\_2016.pdf](https://gwec.net/wpcontent/uploads/2020/12/GWEO_2016.pdf)>. Acesso em: 14 de fev. de 2022.
- Hernandez-Estrada, E. et al. Considerations for the structural analysis and design of wind turbine towers: A review. *Journal of Propulsion and Power*, v. 17, n. 1, p. 99–110, 2001.
- Liu, X. et al. An improved dynamic stall model and its effect on wind turbine fatigue load prediction. *Renewable Energy*, v. 156, p. 117–130, 2020. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120305723>.
- Oliveira, L. *Análise do Comportamento Dinâmico de Torres de Geradores Eólicos*. 2012. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ozawa, M. *Aplicação de Parâmetros da Distribuição de Weibull na Análise do Potencial Energético de um Microgerador Eólico em cidades do Estado do Paraná*. 2017. Tese (Graduação) — Universidade Federal Tecnológica do Paraná.

#### 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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