

# ESTUDO E MODELAGEM DE TURBINAS EÓLICAS VERTICAIS

**Palavras-Chave:** Modelagem, Análise Dinâmica, Turbina Eólica Vertical

**Autores(as):**

**MARIA VITÓRIA DIAS DE MEDEIROS MENDES, DSI – FEM**

**Prof. Dr. GREGORY BREGION DANIEL, DSI - FEM**

---

## INTRODUÇÃO:

A necessidade de mitigação da poluição ambiental global proveniente do intenso uso de combustíveis fósseis, provocou um aumento significativo no desenvolvimento das fontes de energia renováveis ao longo dos anos. Dessa forma, a energia eólica sofreu grandes avanços tecnológicos desde o início de sua exploração enquanto fonte de energia sustentável, o que permitiu o amadurecimento e a consolidação do modelo atualmente utilizado: uma turbina eólica de grande porte, composta por um eixo de rotação horizontal, três pás posicionadas contra o vento, submetidas a velocidade e passo de pá variáveis (*HAWTs– Horizontal Axis Wind Turbine*). Entretanto, tendo em vista a necessidade de aumentar a produção e otimizar a exploração dessa fonte sem provocar impacto nos centros urbanos, estudos recentes voltaram-se para o deslocamento dos parques eólicos para a zona marítima, trazendo de volta o interesse em turbinas eólicas de eixo vertical (*VAWTs– Vertical Axis Wind Turbine*).

As turbinas eólicas de eixo vertical mostram-se promissoras em cenário offshore considerando importantes fatores estruturais e econômicos, entre eles a altura do rotor e do gerador, localizados próximos a base da torre, o que permite fácil acesso e rápida manutenção, promovendo uma redução do custo do ciclo de vida desse mecanismo. Ademais, a insensibilidade à direção do vento e os baixos níveis de ruído e distorção de fluido possibilitam a redução de acidentes envolvendo pássaros e permitem que máquinas consecutivas sejam instaladas com menor espaçamento entre elas, otimizando a distribuição nos parques eólicos. Entretanto, apesar das vantagens apresentadas, as VAWTs ainda precisam passar por diversos estudos, a fim de compensar o avanço tecnológico sofrido pelas HAWTs nos últimos anos, a fim de permitir uma produção de energia sustentável otimizada e em larga escala.

Dessa forma, compreender a dinâmica complexa do sistema flutuante submetido ao hostil ambiente encontrado na zona marítima demanda o entendimento de diversas áreas de especialização, tornando necessário concentrar esforços na modelagem estrutural do mecanismo, assim como na detalhada análise dinâmica, tanto do sistema rotativo quanto da base flutuante. Portanto, o presente projeto tem como objetivo contribuir nesta área de pesquisa, especificamente na modelagem e análise dinâmica do conjunto rotativo de uma turbina eólica de eixo vertical, possibilitando uma melhor compreensão dos principais efeitos e fenômenos envolvidos no funcionamento da máquina, a fim de identificar os componentes críticos e susceptíveis a falhas durante a operação.

## METODOLOGIA:

De maneira simplificada, é possível entender a turbina eólica de eixo vertical (VAWT) como uma máquina rotativa, composta por um eixo, mancais e engrenagens, na qual o rotor é posicionado transversalmente à direção do vento e os demais componentes encontram-se na base, sendo eles a caixa de transmissão e o gerador, como pode ser observado na figura ao lado. A fim de realizar a análise do comportamento dinâmico de uma máquina rotativa, um modelo pode ser desenvolvido utilizando o método dos elementos finitos, que consiste na divisão do mecanismo em uma quantidade finita de pequenos elementos conectados entre si por meio de nós, representados individualmente por uma matriz elementar. Dessa forma, a matriz global do sistema pode ser obtida a partir da sobreposição das matrizes dos elementos, realizada a partir dos nós nos quais os elementos estão conectados, permitindo a modelagem completa da máquina.

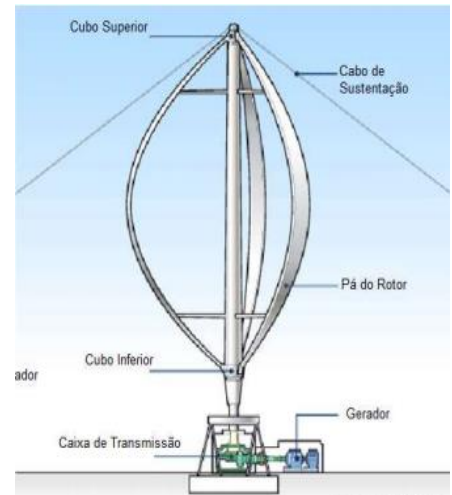


Figura 1- Configuração básica de uma turbina eólica vertical [2]

Dessa maneira, o comportamento do sistema completo considera tanto a característica do rotor quanto dos mancais e demais componentes. Assim, a resposta dinâmica do sistema pode ser representada pela seguinte equação de movimento:

$$[M_{global}]\{\ddot{q}\} + ([C_{global}] + \Omega[G_{global}])\{\dot{q}\} + [K_{global}]\{q\} = \{f\} \quad (1)$$

Sendo que as matrizes globais  $[M_{global}]$ ,  $[K_{global}]$ ,  $[G_{global}]$  e  $[C_{global}]$  representam, respectivamente, as matrizes de massa, rigidez, giroscópica e de amortecimento. Além disso,  $\{f\}$  representa o vetor de forças externas e  $\{q\}$  o vetor formado pelos graus de liberdade do sistema, enquanto  $\Omega$  é a velocidade de rotação do rotor. Assim, reescrevendo a Equação (1) utilizando a representação por espaço de estados, a matriz dinâmica por ser obtida:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M_{global}]^{-1}[K_{global}] & -[M_{global}]^{-1}([C_{global}] + \Omega[G_{global}]) \end{bmatrix} \quad (2)$$

A partir da Equação (2) é possível obter o diagrama de Campbell, que mostra a variação da frequência natural do rotor em função da velocidade de rotação, assim como o estudo da estabilidade do sistema rotativo a partir da análise do problema do autovalor, uma vez que os autovalores da matriz dinâmica  $[A]$  representam as frequências naturais e os autovetores representam os modos de vibrar. Vale salientar que, a partir da base teórica apresentada, as simulações computacionais foram realizadas com o auxílio do software *Ansys Workbench 2023*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Este estudo tem como base a turbina eólica vertical de 34m de diâmetro, amplamente explorada para testes pelo Laboratório de Sandia. Assim, foram realizados os modelos e análises dinâmicas do conjunto rotativo dessa turbina. Como referência para os resultados obtidos, foram utilizados dados da literatura gerados através da ferramenta de elementos finitos *Ansys*, onde foram utilizados elementos de viga de Timoshenko, contando com um total de 208 elementos e 215 nós (1290 graus de liberdade). Neste estudo da literatura, o autor optou por topo e base fixos e as seções transversais foram consideradas constantes para fins de simplificação. Dessa forma, foram gerados os dados registrados, a

| Modos | Frequências (Hz) |
|-------|------------------|
| 1     | 0,9931           |
| 2     | 0,9997           |
| 3     | 1,5823           |
| 4     | 1,6665           |
| 5     | 2,0265           |
| 6     | 2,0716           |
| 7     | 3,0547           |
| 8     | 3,3088           |
| 9     | 3,3478           |
| 10    | 3,38             |

Tabela 1 - Frequências de referência [1]

partir de uma velocidade rotacional de 0 a 50 rpm, sendo as frequências apresentadas na Tabela 1 e os modos de vibrar, com destaque para os modos 6,7,8 e 9, apresentados na Figura 2.

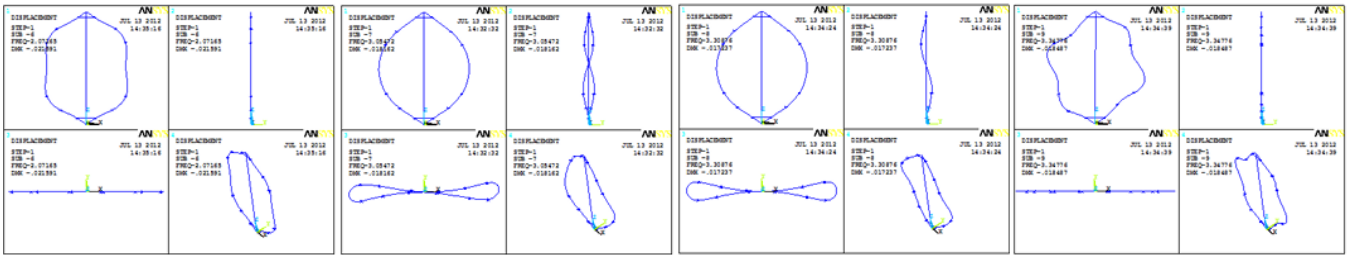


Figura 2- Modos de vibrar para a turbina de 34m encontrados na literatura. [1]

A fim de realizar o estudo do comportamento dinâmico da turbina de 34m de diâmetro utilizando o Ansys, um modelo simplificado foi desenvolvido utilizando o software de modelagem 3D, *Creo Parametric*. Para isso, foram adotadas como referência, informações do design da máquina disponíveis na literatura, referentes ao diâmetro e espessura da torre, dimensionamento das pás e comprimento dos perfis que as compõem. Entretanto, as estruturas de conexão entre a torre e as pás foram modeladas de maneira arbitrária e simplificadas como vigas devido à falta de conhecimento de suas especificações, enquanto as pás foram modeladas com um único perfil a fim de simplificar a construção da malha.

Dessa forma, a partir do modelo descrito, as análises modais foram obtidas através do Ansys, utilizando como material a liga de alumínio padrão da biblioteca do software e uma malha composta por, em média, 65000 elementos e 130000 nós. Quanto as condições de contorno, as extremidades foram consideradas fixas de maneira semelhante ao que foi realizado no trabalho de referência, a fim de representar a rigidez conferida pelos cabos de sustentação e mancais de rolamento. Dessa forma, aplicando uma velocidade rotacional de 0 a 50 rpm, a solução é gerada para os 10 primeiros modos, o que permite a obtenção do Diagrama de Campbell, as frequências naturais e seus respectivos modos de vibrar. Entre os resultados gerados, é possível destacar as simulações obtidas a partir da variação da geometria da viga de ligação entre a torre e as pás, tendo em vista suas dimensões desconhecidas, permitindo uma análise da sua influência no comportamento dinâmico do mecanismo.

Dessa maneira, a Simulação 1 considera uma viga de 400mm de largura e 100mm de espessura, enquanto a Simulação 2 utiliza uma viga com largura igual a 1000mm e 100mm de espessura e, por fim, a Simulação 3 considera a viga de ligação também com largura igual a 1000mm, porém uma espessura igual a 200mm. Assim, as frequências obtidas para cada caso encontram-se na tabela 2 e os modos de vibrar, com destaque para os modos 6,7,8 e 9, foram registrados nas figuras 4, 5 e 6.

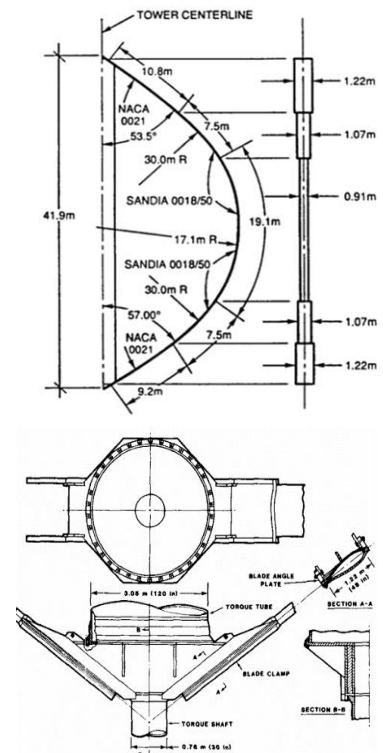


Figura 3 – Dimensionamento da turbina de 34m do Laboratório de Sandia [4]

| Simulação 1 | Simulação 2 | Simulação 3 |
|-------------|-------------|-------------|
| 0,89953     | 1,3914      | 1,4116      |
| 1,3611      | 1,5042      | 1,5696      |
| 1,3772      | 1,5355      | 1,6709      |
| 1,4774      | 2,1324      | 2,1575      |
| 1,9547      | 3,3807      | 3,4781      |
| 2,0859      | 3,4095      | 4,1193      |
| 2,1589      | 4,0542      | 4,3436      |
| 3,1662      | 4,1769      | 4,6792      |
| 3,9271      | 4,6072      | 5,5591      |
| 4,1445      | 5,1429      | 5,8652      |

Tabela 2- Frequências em Hz obtidas nas simulações 1,2 e 3.

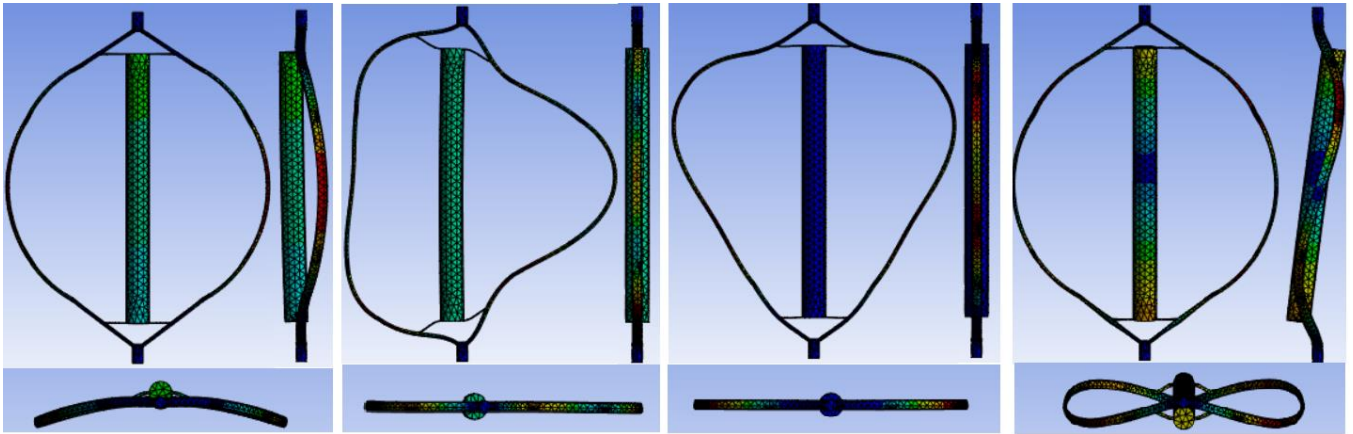


Figura 4 - Modos de vibrar 6,7,8 e 9 obtidos na Simulação 1.

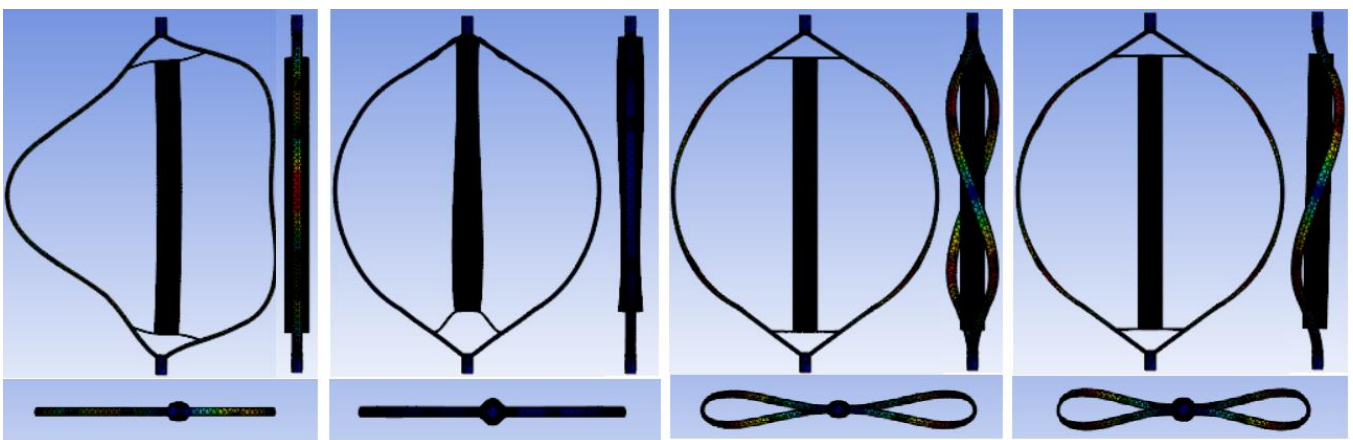


Figura 5 - Modos de vibrar 6,7,8 e 9 obtidos na Simulação 2.

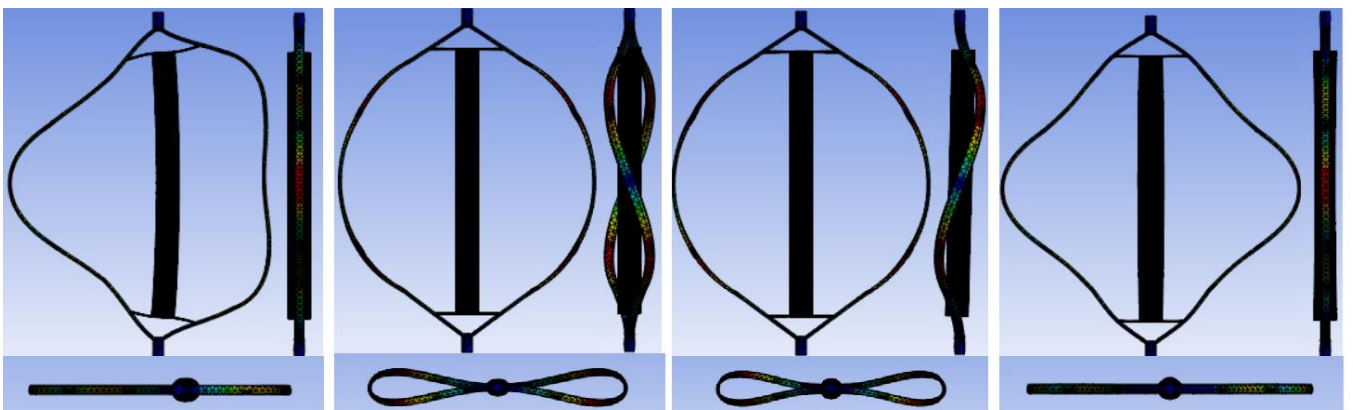


Figura 6 - Modos de vibrar 6,7,8 e 9 obtidos na Simulação 3.

Dessa forma, é possível notar na primeira simulação a presença de modos de vibrar que envolvem deslocamento e deformação da torre, o que destoa do que foi apresentado no trabalho de referência e mostra a importância da estrutura de conexão na rigidez da máquina. Em seguida, a Simulação 2 reforça a influência da largura da viga no comportamento do sistema, uma vez que foi possível identificar o surgimento do modo de deformação das pás e os modos de torção em 6, 8 e 9, respectivamente, sem haver deformação da torre. Por fim, ao aumentar a espessura da estrutura na Simulação 3, houve uma aproximação com a referência, uma vez que o deslocamento da torre deixa de ser observado no modo de vibrar de número 7 e os dois modos de torção assumem as posições 7 e 8,

como desejado. Assim, a observação dos modos permite notar a influência da geometria da viga no surgimento de modos de deslocamento da torre, assim como a influência nos modos de flexão e torção das pás, o que permite reconhecer a importância das estruturas de conexão entre a torre e as pás no bom funcionamento da máquina.

## **CONCLUSÕES:**

A pesquisa de iniciação científica sobre estudo e modelagem de turbinas eólicas verticais foi de grande importância para a melhor compreensão do comportamento dinâmico do mecanismo. Através da análise modal, tornou-se possível entender os componentes que exercem maior influência na rigidez do sistema e, conseqüentemente, nas frequências naturais e seus modos de vibrar. Dessa forma, o estudo forneceu conhecimentos fundamentais para a compreensão dos principais efeitos e fenômenos envolvidos no funcionamento da máquina e para a identificação de componentes críticos e susceptíveis a falhas durante a operação.

---

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1]Owens, Brian C (2013). Theoretical Developments and Practical Aspects of Dynamic Systems in Wind Energy Applications. Doctoral dissertation, Texas A M University. Available electronically from <https://hdl.handle.net/1969.1/151813>.
- [2]MORAES, A. R. (2018). Análise de aumento de desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo vertical por meio de guia de bocais convergentes omnidirecional, Engenharia Mecânica – Instituto Federal do Espírito Santo.
- [3]BATHE, K. J., WILSON, E. J. Numerical Methods in Finite Element Analysis. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1976, 528 p.
- [4]Moore, K. R. and Ennis, B. L.: Aeroelastic Validation of the Offshore Wind Energy Simulator for Vertical-Axis Wind Turbines, Wind Energ. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/wes-2022-91>, 2022.
- [5]RISHMANY, J., DAABOUL, M., TAWK, I., SABA, N. Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine Using FEA, Multibody Dynamics and Wind Tunnel Testing. Athens Journal of Technology and Engineering. 2017.
- [6] HILL, O. (2020) 'A review of the technical challenges faced in floating offshore wind turbine deployment', The Plymouth <http://hdl.handle.net/10026.1/16512> Student Scientist, 13(1), p. 238-252.