

ESTUDO DE SENSIBILIDADE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE TORRES TUBULARES PARA GERADORES EÓLICOS

Télio Fernandes Mendes, teliofm@hotmail.com¹
João Carlos Menezes, menezes@ita.br¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias
CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

Resumo: *O propósito deste trabalho é contribuir na definição de uma metodologia para o dimensionamento de torres tubulares flexíveis de geradores eólicos, dentro do contexto nacional quanto às tecnologias e materiais disponíveis, com o propósito de obtenção de uma geometria ótima. A torre estudada foi verificada quanto a seu comportamento vibracional, dentro de faixas seguras de frequências naturais, bem como, o seu comportamento quanto à resistência estática e estabilidade elástica.*

Palavras-chave: *energia eólica, análise estrutural, torres*

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade por fontes alternativas de energia limpa e renovável motivou o presente trabalho como forma de contribuir para o desenvolvimento tecnológico sustentável na área estrutural voltado a geração de energia eólica.

Embora muitas torres de geradores eólicos sejam construídas na forma de treliça, Fig. (1), Sathyajith (2006) afirma que a grande maioria das torres de alta capacidade de geração é tubular.

Como impedimento na utilização de treliças para torres mais altas, tem-se as limitações de aberturas das pernas que podem interferir com as pás, citado por T. Burton, et al. (2001), maior complexidade de montagem, maiores pontos de falha ou de inspeção representados pelas inúmeras ligações parafusadas ou soldadas.

Neste aspecto, as torres tubulares levam vantagem apesar do maior consumo de material, como cita a Danish Wind Turbine Manufacturer Association (2001). As torres tubulares possuem maior eficiência em sua rigidez, tem pontos discretos de ligação entre os módulos que facilitam a sua montagem a grandes alturas, facilitando inclusive, a segurança dos montadores.

O desenvolvimento se inicia com a definição dos requisitos da torre de acordo com a potência do gerador eólico. A partir da avaliação do empuxo e de frequência de funcionamento das pás, vários modelos geométricos devem ser construídos com o propósito de se avaliar a sensibilidade da mudança das variáveis geométricas nos requisitos de integridade da torre.

O presente trabalho relata alguns resultados obtidos no estudo da configuração de uma torre tubular a ser empregada em um gerador eólico de 100 kW.

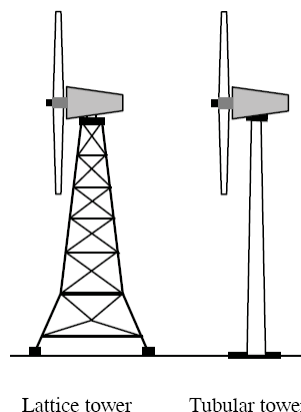


Figura 1. Principais tipos de torres para geradores eólicos – Treliça e Tubular.

2. DESENVOLVIMENTO

Para um gerador eólico de 100 kW, uma torre de configuração tubular com uma altura de 24 m é estudada.

O Brasil ainda não possui uma norma específica para o dimensionamento destas estruturas, como normas internacionais citam-se a IEC 61400-1, Wind Turbine Safety and Design, e a IEC 61400-2, Small Wind Turbine Safety.

Como principal requisito, além de resistência mecânica e estabilidade estrutural às cargas estáticas em flambagem, consideram-se a avaliação das frequências naturais dos modos de vibração da torre, levando-se em conta que os valores dessas frequências devam ser distantes à frequência de rotação das pás do gerador (torre rígida).

Para efeito de dimensionamento da torre do gerador de 100 kW, uma avaliação das características das pás foi feita preliminarmente. Utilizando de um software de otimização de pás de geradores eólicos, conforme Menezes e Donadon (2008,2009), para uma velocidade de vento de 12,5 m/s a força de empuxo obtida para as pás foi de 15918 N, e para uma velocidade de 30 m/s, condição de rajada, estimou-se força de empuxo em 92000 N. O raio ótimo da pá, na condição nominal de velocidade de vento de 12,5 m/s, foi de 8,147 m e a razão de velocidade $\lambda = 6,759$, o que corresponde a uma velocidade de rotação de 99 rpm ou a uma frequência de excitação das pás de 1,65 Hz. Optou-se no dimensionamento da torre pelo critério de “torre rígida”, ou seja, na avaliação vibracional todas as frequências naturais devem ser superiores à frequência de excitação de 1,65 Hz. Atenção também deve ser dada ao fato que, por questões do distúrbio aerodinâmico produzido pela passagem de uma das pás pela “sombra” da torre, uma frequência de excitação de três vezes a de 1,65 Hz também deva ocorrer, ou seja, 4,95 Hz. Todos os modos de vibração da torre devem estar afastados dos modos de excitação.

Os testes propostos trabalham no estudo de sensibilidade com a mudança das variáveis de projeto e geométricas da torre: a altura da torre, o peso do gerador, os diâmetros da base e do topo da torre, espessura das chapas da torre e na separação da torre em módulos flangeados para sua interligação.

No final optou-se por uma geometria com alta producibilidade. Com esse intuito foram consideradas as dimensões comerciais para as chapas da torre, tanto em largura, comprimento e espessura, a tecnologia de corte, solda e usinagem, e os requisitos de transporte e de montagem. Acrescenta-se também que as dimensões da torre devem tornar viável o fácil acesso para a manutenção.

A torre tubular possui formato cônico aberto para facilitar a instalação do gerador, melhorar sua rigidez e impedir interferência com as pás. É previsto também que a montagem dos módulos da torre seja feita através de juntas flangeadas, unidas por parafusos.

3. METODOLOGIA

Para o estudo de sensibilidade e desempenho da torre tubular para geradores eólicos foi utilizado um software comercial de CAD, CATIA V5 R18, para agilidade no desenho dos diversos modelos e variações. Para o cálculo estrutural foi utilizado um software comercial de elementos finitos, ANSYS V12, para todas as etapas de cálculo: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

A Tabela (1) lista as diversas configurações testadas com as variáveis alteradas conforme ilustra a Figura (2).

Tabela 1. Testes com mudanças nas variáveis de projeto.

Teste Torre	Altura (m)	Diâmetro Base (m)	Diâmetro Topo (m)	Espessura (mm)	Peso Gerador (ton)	Módulos
Teste 1	21	3,0	1,8	5,0	3,5	1
Teste 2	21	3,0	1,8	5,0	4,0	1
Teste 3	24	3,0	1,8	5,0	4,0	1
Teste 4	24	3,0	1,8	6,3	4,0	2
Teste 5	24	1,5	0,9	9,5	4,0	4

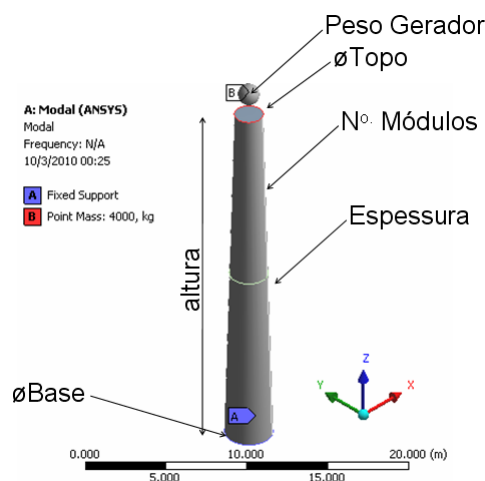


Figura 2. Principais variáveis de torres tubulares para geradores eólicos.

4. RESULTADOS

4.1. Frequências Naturais

A partir dos testes se obteve os resultados apresentados na Tabela (2).

Tabela 2. Resultados de frequências naturais para diversas configurações da torre eólica.

Teste Torre	Modos e Frequências Naturais					
	1	2	3	4	5	6
Teste 1	3.23	3.23	8.19	8.19	8.23	8.23
Teste 2	2.99	2.99	4.03	4.03	8.23	8.23
Teste 3	2.21	2.51	6.52	6.52	7.75	7.75
Teste 4	2.74	2.74	13.20	13.20	15.73	15.73
Teste 5	3.21	3.21	17.78	17.78	27.80	31.40

A seguir, as Figuras (3) (4) e (5) apresentam os testes n°3, n°4 e n°5 na sequência com as condições de contorno e os resultados obtidos para os autovalores e autovetores. Os resultados dos testes n°1 e n°2 não são apresentados por serem preliminares e não terem oferecido adequação aos requisitos de projeto.

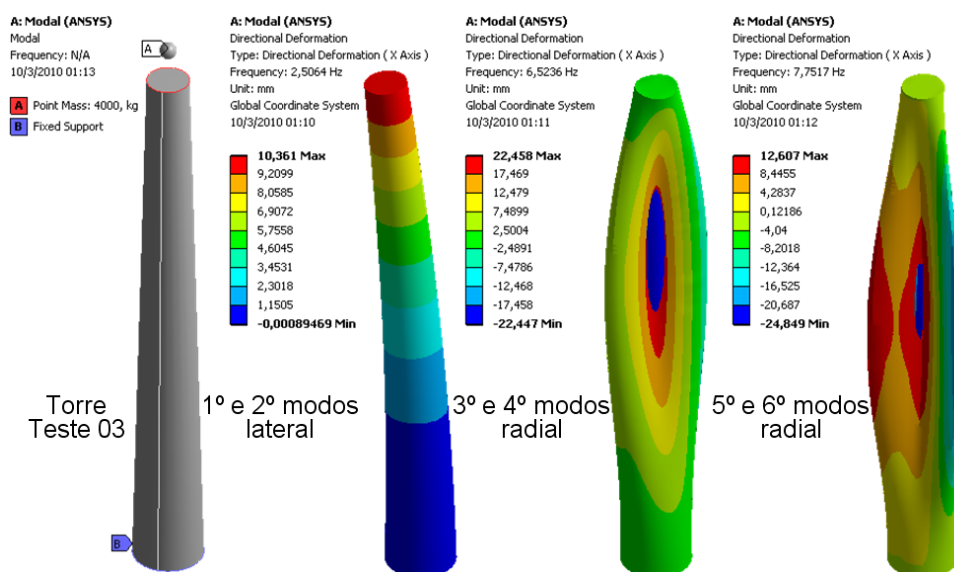


Figura 3. Autovalores e autovetores da torre tubular – teste n°3

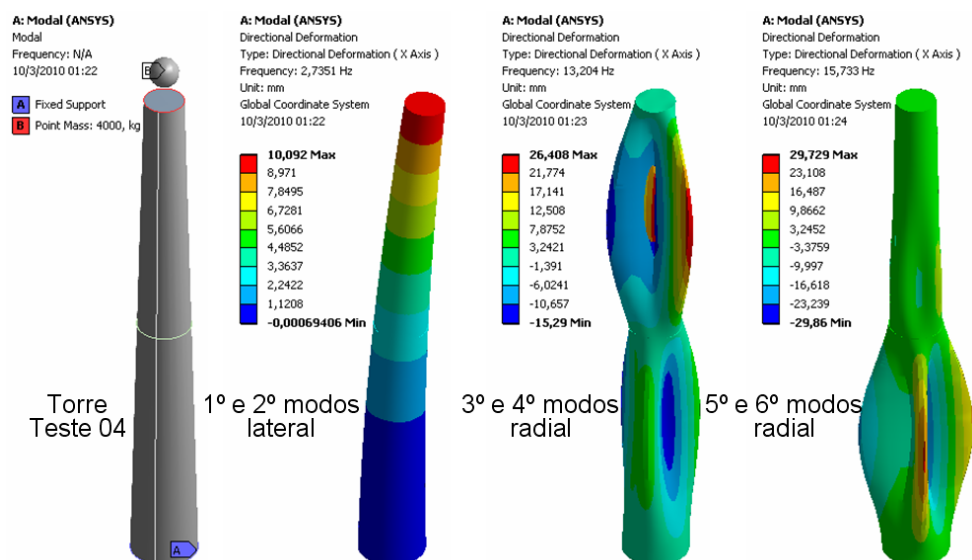


Figura 4. Autovalores e autovetores da torre tubular – teste n°4

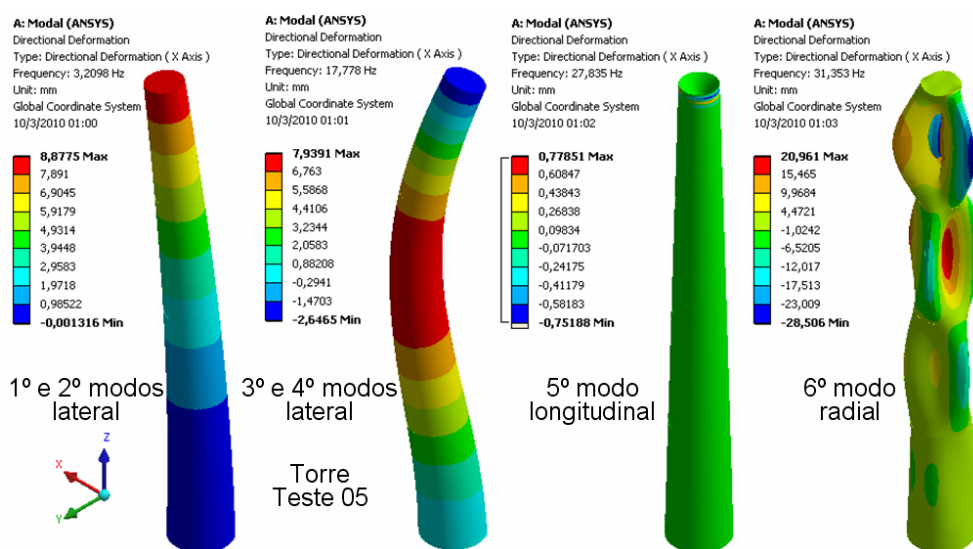


Figura 5. Autovalores e autovetores da torre tubular – teste n°5

As condições de contorno e a divisão por módulos do teste n°5 serão apresentadas a seguir na seção de análise estática.

4.2. Análise Estática e Flambagem

Após os testes definiu-se pela torre com a configuração geométrica equivalente ao teste n°5, conforme Figura (6). Os resultados da análise estática, tanto de tensão como de deslocamento e de flambagem para uma carga de empuxo das pás de 92.000N são a seguir apresentados.

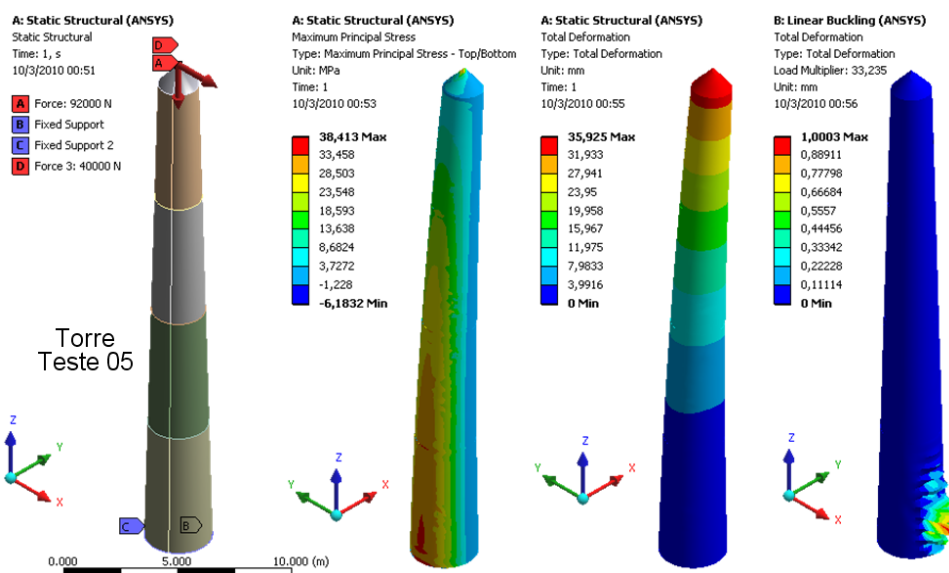


Figura 6. Condições de Contorno e Resultados Análise Estática – teste n°5

5. DISCUSSÃO

Como observado, a partir do teste n°1 para o teste n°2, com o aumento da massa conjunta na nacela de 3500 kg para 4000 kg, os valores da frequência fundamental foi reduzida. Mais uma vez buscando-se maximizar a eficiência na geração de energia a partir de ventos mais velozes e constantes (Manweell, ET AL., 2006) aumentou-se a altura da torre de 21,0 m para 24,0 m entre os testes n°2 e o teste n°3. Mantendo-se todas as demais condições geométricas inalteradas, e agora se incluindo um reforço interno flangeado na metade da altura da torre, observou-se uma diminuição da frequência do modo de flexão e um característico aumento das demais frequências.

Embora a frequência de 2,21 Hz para o modo fundamental seja superior ao valor de 1,65 Hz do teste n°3; novos modelos foram concebidos com o intuito de aumentar a rigidez da torre sem grandes acréscimos em sua massa.

Optou-se por projetar a torre em módulos flangeados o que acresceria enrijecedores ao longo da altura desta. Nesse teste n°4, os módulos foram concebidos com uma altura de 12m, de modo que a altura total da torre correspondesse a duas vezes a altura de cada um dos dois módulos. O resultado foi o aumento dos valores do terceiro e quarto modos de vibração circunferenciais. Com a adoção dos flanges na junção dos módulos esses valores aumentaram de 6,5Hz para 13,2Hz.

Com base neste estudo de sensibilidade chegou-se a uma geometria final apresentada como torre do teste n°5. Aumentando-se a espessura da chapa de 5,0mm para 9,7mm, e com quatro módulos, cada um de 6m de altura; observou-se uma contribuição no aumento da frequência natural do primeiro e segundo modo de vibração, além de uma apreciável contribuição para o aumento da frequência do primeiro modo circunferencial que atingiu 31,4 Hz.

Além disso, os diâmetros da base e do topo foram reduzidos com fim de adaptar as dimensões da torre a veículos de transportes menos sofisticados.

Observa-se também que os demais requisitos de integridade da torre foram verificados com conforto. Considerando-se conservativamente o limite de escoamento do aço a 165MPa tem-se uma margem de segurança altíssima, cerca de 330%. A margem de flambagem foi de 3300% e o deslocamento máximo no topo para um carregamento crítico de 92000 N foi de 35,9mm.

O dimensionamento da torre no teste n°5 também foi planejado com fim em sua fabricação. Pode-se citar que a altura de 6 m dos módulos e as espessuras de 6 mm ou 9,7 mm são compatível com as dimensões padrões de chapas laminadas comerciais.

Os módulos limitados a 6,0m facilitam seu transporte e montagem. A altura da torre também foi limitada em 24 m tendo em vista a capacidade de guindastes comuns. Guindastes comerciais montados em caminhões de capacidade modesta podem atingir um comprimento de lança de até 32 m, comprimento esse bastante adequado para a altura de torre adotada.

6. CONCLUSÃO

A construção de torres tubulares modulares para fins de geração eólica representa um desafio de engenharia, tanto no aspecto estrutural como no aspecto de fabricação e montagem.

Tem-se por certo que os critérios de vibração mecânica, resistência estática e estabilidade elástica da torre devem ser sempre aplicadas e verificadas. Nesse trabalho, com a adoção de um critério de torre rígida, a verificação estática e de flambagem revelaram margens de segurança apreciavelmente grandes para a carga de empuxo aplicada. O requisito de vibrações mecânicas mostrou-se o mais crítico, particularmente com a consideração de uma massa equivalente ao da

nacele no topo da torre. Esse acréscimo de massa resulta em uma previsível diminuição das frequências naturais da torre avaliada.

7. REFERÊNCIAS

- M. Sathyajith, "Wind Energy – Fundamentals, Resource Analysis and Economics", Springer-Verlag, Germany, pp. 99, 2006.
- "Guided Tour on Wind Energy", Danish Wind Turbine Manufacturer Association, pp. 105, January 2001, <http://www.windpower.dk/tour/Index.htm>
- M. V. Donadon, R Savanov, J. C. Menezes, and Lindolfo A. M. F., "A Numerical Tool to Design Blades for Horizontal Axis Wind Turbines with Variable Geometry", V National Congress of Mechanical Engineer, Salvador, Bahia, Brazil, August 2008.
- Menezes, João Carlos, Donadon, M. V., "Optimum Blade Design of a 2 MW Horizontal Axis Wind Turbine", 20th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2009, Gramado, RS, Brazil.
- T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Boassanyi, "Wind Energy Handbook", Wiley, pp. 374, 453-464, 2001.
- J.F.Manwell, J.G.McGowan, and A.L. Rogers, "Wind Energy Explained", John Wiley & Sons, 2006.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SENSIBILITY ANALYSIS AND DIMENSIONING OF A TUBULAR TOWER FOR WIND GENERATORS

Télio Fernandes Mendes, teliofm@hotmail.com¹

João Carlos Menezes, menezes@ita.br¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias
CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

Abstract: *The purpose of this study is to define a methodology for the design of flexible tubular towers of wind turbines within the national context and the technologies and materials available, with a view to optimal geometry. Checking rigidity within the safe range of modes of vibration excitation of the wind energy and its behavior as the static analysis and buckling.*

Keywords: *wind energy, structural analysis, towers*