

OPTIMIZED STRUCTURAL DESIGN OF STEEL TUBULAR TOWERS OF WIND TURBINES

Raphael de Oliveira Guedes de Melo

raphael.melo@ceca.ufal.br

Márcio André Araújo Cavalcante

marcio.cavalcante@ctec.ufal.br

Federal University of Alagoas

Av. Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió, 57072-900, Alagoas, Brazil.

Abstract. The wind energy is an important renewable energy resource, and it has been recently explored in Brazil, with a strong tendency to increase in the next decades, considering the Brazil's potential. The most common way to explore the wind energy is through the wind turbines, usually designed to have a maximum efficiency. The tower is an important part of the wind turbine design, once it defines the wind turbine efficiency and must be designed to resist to different loadings, responding for 30% of the wind turbine cost, approximately. This work presents a structural optimization study of steel tubular towers of wind turbines, within a framework based on the strength of materials and the principle virtual work for the structural analysis of the tower, besides optimization techniques, with the goal to minimize the tower's weight. Some comparisons are made with optimized aluminum tower. The minimization of the tower's weight through the employment of optimization techniques allows a reduction of the costs with inputs, transportation, assembling and maintenance of the tower, especially those ones that will be installed in remote areas with difficult access, besides contributing with the study of this technology.

Keywords: Wind turbine, Tubular Tower, Steel, Aluminum, Structural optimization.

1 Introdução

As fontes de energias renováveis apresentam como principais características o fato da sua exploração não representar qualquer variação significativa em seu potencial e pela capacidade de se reconstituir sem grandes dificuldades. As questões ambientais e a preocupação com a manutenção dos recursos não renováveis, atrelados ao barateamento das tecnologias renováveis, indicam um panorama favorável.

A partir da análise dos dados da International Renewable Energy Agency (IRENA), fica notório o crescimento da capacidade instalada de algumas fontes renováveis de energia, vale ressaltar a importância da energia eólica neste cenário. Especialistas acreditam que a Energia Eólica (EE) é uma fonte energética capaz de suprir as demandas de uma sociedade sem prejudicar gerações futuras, e, por conta disso, o uso dessa fonte renovável vem crescendo [1].

O material mais comumente empregado na confecção de torres de aerogeradores é o aço, mas também pode ser utilizado o concreto armado, ou até mesmo estruturas híbridas (concreto e aço). Do ponto de vista estrutural, as torres eólicas podem ser do tipo tubular, tripé, treliçada e atirantadas (estaiadas) [2].

Para uma inserção massiva da energia eólica, além da avaliação do potencial eólico, faz-se necessário um estudo para diminuição de gastos no processo de manufatura das torres, que estão compreendidos em aproximadamente 30% do custo total. Sendo assim, os estudos voltados para à otimização estrutural das torres de aerogeradores passam a ser muito relevantes.

Este trabalho se propõe apresentar os resultados de um estudo de otimização através de uma ferramenta computacional que tem como objetivo desenvolver soluções estruturais mais leves, com o intuito de facilitar o transporte, a instalação e a manutenção de torres do tipo tubular telescópica de aerogeradores em aço e alumínio.

2 Metodologia

Na formulação adotada, escolheu-se como topologia a torre tubular do tipo telescópica, a mesma tem como principais características: (I) não apresenta variação de espessura ao longo de toda altura da torre; (II) não apresenta variação de raio ao longo de cada trecho; (III) não apresenta variação na folga entre os trechos. As respostas de interesse incluem esforços, tensões e deslocamentos. As ações atuantes estão representadas na Fig. 1.

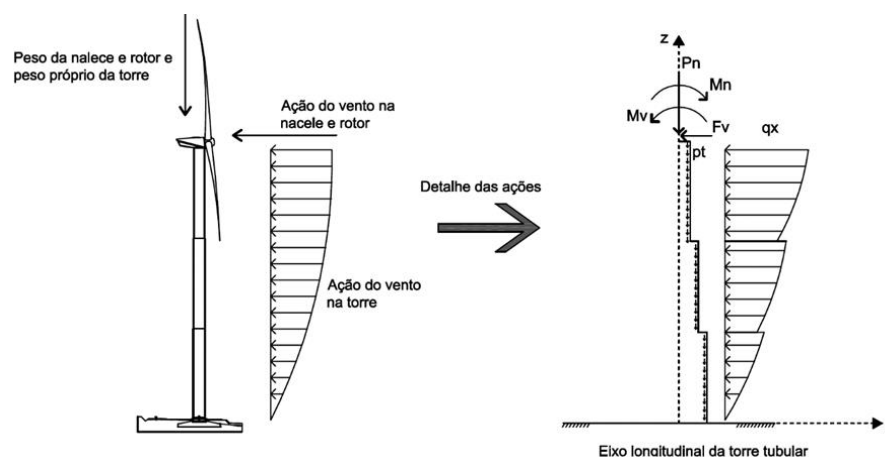


Figura 1. Representação ilustrativa da torre e o modelo de cálculo [3].

A análise estrutural foi realizada para torres de 2 a 6 trechos, com 18 metros de altura e em duas configurações. Na primeira configuração, o raio interno do trecho abaixo coincide com o raio externo

do trecho imediatamente acima, já na segunda configuração, considerou-se um espaçamento de 5cm entre o raio interno do trecho abaixo e o raio externo do trecho imediatamente acima.

A força de arrasto que atua no topo da torre pode ser avaliada pela Eq. (1) [4].

$$F_v = \frac{1}{2} A \cdot n \cdot \rho \cdot V_o^2 \quad (1)$$

sendo A a área de varredura do rotor, n o número de pás, ρ a densidade do ar (1.131 kg/m³) e V_o a velocidade básica do vento.

Foi adotada a hipótese que o vento só produz uma pressão dinâmica p_v que atua perpendicularmente à parede lateral da torre, e que varia longitudinalmente e transversalmente de acordo com a Eq. (2) [5].

$$p_v(\theta, z) = H_\theta(\theta) H_z(z) Q_v \quad (2)$$

A análise da velocidade básica do vento, por meio do emprego do mapa de isopletras do Brasil, bem como dos fatores de ponderação, que levam em conta a topografia, a rugosidade do terreno e os aspectos estatísticos da construção, estão embasados na NBR 6128 [6]. Esta abordagem permite que se aplique a velocidade caracterísitca do vento para o estado limite último da estrutura. No caso do estado limite de serviço, se emprega a velocidade nominal do aerogeador como velocidade básica, tratando-se da velocidade em que aerogerador entrega a máxima potência de saída.

Assim, o carregamento distribuído resultante da carga de vento na torre é avaliado pela Eq. (3).

$$q(z) = \int_0^{2\pi} p_v(\theta, z) R_e(z) \cos \theta d\theta \quad (3)$$

sendo θ o ângulo formado com o eixo x no plano horizontal (Fig. 1) e R_e o raio externo do trecho.

Os esforços internos solicitantes na torre telescópica são avaliados de acordo com a Eq. (4) e Eq. (5). Para determinar a tensão normal longitudinal, sobrepõem-se as tensões oriundas da fórmula da flexão aquelas advindas de elementos de barra sujeitos a carga axial, sendo a mesma expressa através da Eq. (6).

$$N(z) = -P_N - \int_z^H p_t(z') \cdot dz' \quad (4)$$

$$M(z) = M_v - M_n + F_v(H-z) + \int_z^H q(z')(z'-z) dz' \quad (5)$$

$$\sigma_z(\theta, r, z) = \frac{N(z)}{A} + \frac{M(z)}{I} r \cos \theta \quad p/ \begin{cases} R_i \leq r \leq R_e \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

sendo A a área, I o momento de inércia e R_i o raio interno.

Para análise de deslocamentos é empregado o princípio dos trabalhos virtuais. Na torre tubular telescópica a carga virtual δP possui valor unitário e atua perpendicularmente ao eixo z . Com isso, a análise de tensões do sistema virtual e o deslocamento real ao longo de toda torre são avaliados pelas Eq. (7) e Eq. (8), respectivamente.

$$\delta \sigma_z(\theta, r, z') = \frac{-\delta P(z-z')}{I(z')} r \cos(\theta) \quad (7)$$

$$u_x(z) = \int_0^z \int_{R_i(z)}^{R_e(z)} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\delta \sigma_z(\theta, r, z') \sigma_z(\theta, r, z')}{E} \right] d\theta dr dz' \quad (8)$$

2.1 Otimização Estrutural

A otimização estrutural é a ferramenta que permite encontrar a solução otimizada a partir de funções matemáticas que descrevem o comportamento físico da estrutura. Dada a concepção do problema, a procura pela estrutura otimizada passa pelo emprego da toolbox de otimização do MATLAB®.

Os elementos de um problema de otimização são: (I) variáveis de projeto; (II) função objetivo; (III) conjunto de restrições. A função utilizada foi a *fmincon* e a partir dela obtem-se os valores

precisos para as variáveis de projeto, atendendo-se as restrições. A Fig. 2 apresenta a rotina de otimização empregada.

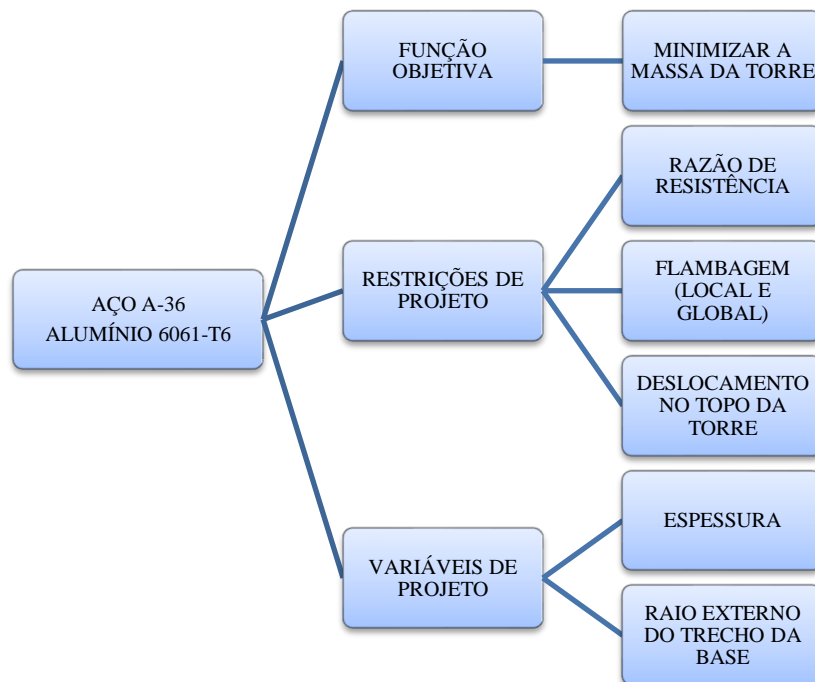


Figura 2. Elementos da otimização empregada por meio da função *fmincon*.

O estudo comparativo se deu entre uma liga de aço e a uma liga de alumínio forjada. As propriedades mecânicas destes materiais se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais avaliados [7].

Material	Peso específico (Mg/m ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Coefficiente de Poisson
Aço A-36	7.85	200	250	0.32
Alumínio 6061-T6	2.71	68.9	255	0.35

Afim de proporcionar confiabilidade à análise estrutural, foram utilizados coeficientes de majoração de cargas e de ponderação da resistência baseados na NBR 8800. O deslocamento no topo da torre máximo admissível é dado por $H/400$, onde H é a altura da torre [8].

Para as flambagens local e global, foram empregados como coeficientes de ponderação 3 e 5, respectivamente, e expressões encontradas em Timoshenko e Gere [9] para cascas circulares de parede fina e colunas com diferentes trechos.

3 Resultados

Os resultados da análise estrutural por meio da *fmincon* para ambas configurações propostas culminaram em soluções otimizadas limitadas pelas restrições de flambagem global e flambagem local no trecho da base da torre. Para a primeira configuração (sem folga), os resultados indicaram uma torre com maior massa com o aumento no número de trechos. No caso da otimização da torre para a segunda configuração (com uma folga de 5 cm entre trechos), verificou-se um decréscimo da massa a medida que se acrescenta trechos. A Figura 2 apresenta os resultados otimizados para o Aço A-36 e para o Alumínio 6061-T6 considerando-se a segunda configuração.

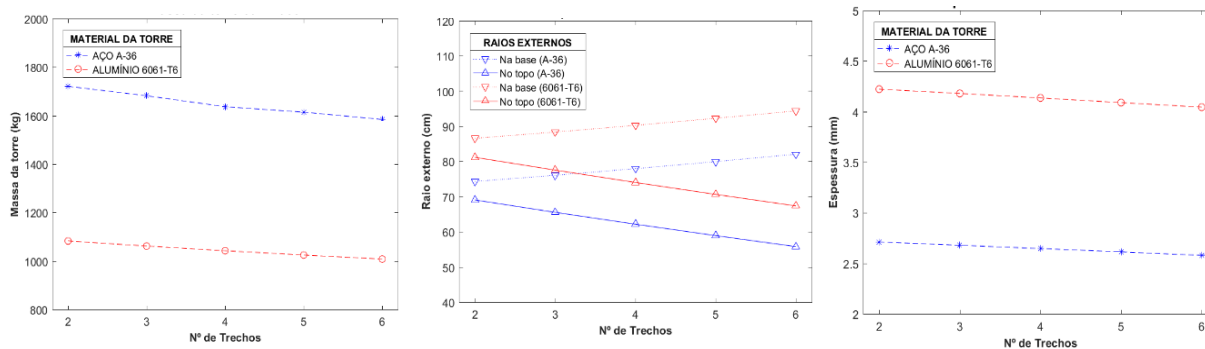


Figura 2. Resultados gráficos da otimização por meio da *fmincon* para uma torre de 2, 3, 4, 5 e 6 trechos e com uma folga de 5 cm entre trechos. Massa otimizada (esquerda), raios externos no trecho da base e no trecho do topo da torre (centro) e espessura otimizada (direita).

4 Conclusões

Para a primeira configuração proposta (sem folga) o acréscimo de trechos não é interessante, pois demandaria maior trabalho para confecção dos trechos e instalação e não haveria a contrapartida de uma solução mais leve.

No caso da segunda configuração (com uma folga de 5 cm entre trechos), os resultados deste estudo de otimização estrutural indicam uma torre mais leve para o material alumínio 6061-T6, porém, a solução ótima para esse material possui um raio externo aproximadamente 15% maior do que o raio externo para solução ótima em Aço A-36, o que poderia ser um inconveniente para a instalação em determinados lugares. Ambos materiais apresentam um decréscimo em sua massa com o aumento do número de trechos da torre, porém, a solução com Aço A-36 apresenta um raio externo no topo da torre menor, sendo algo interessante para o correto funcionamento da turbina eólica.

5 Referências Bibliográficas

- [1] WELCH, J. B e VENKATESWARAN, A. The dual sustainability of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, p. 1121-1126, 2009.
- [2] PESTANA, D. A. C. Sistemas estruturais para torres eólicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2016.
- [3] JUNIOR, A. P. G. Otimização estrutural de torres tubulares de aerogeradores em material compósito. Texto de qualificação. (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, 2018.
- [4] SONG, J. The Comparison and Study of Cone-Shaped Tower and Truss-Type Tower of 1.5 MW Wind Turbine Generator (in Chinese), PhD, Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.
- [5] BILLINGTON, D. P. (1982). *Thin Shell Concrete Structures*, Second edition. New York: McGraw Hill Book Company.
- [6] NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.
- [7] HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 7a Edição. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2010.
- [8] NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [9] TIMOSHENKO S. P. and GERE J. M. *Theory of elastic stability*. New York: McGraw-Hill, 1983.