



METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE TORRES TRELIÇADAS COM MAIS DE 100 METROS DE ALTURA

Aniceto Carlos de Andrade Junior

Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

anicetojunior@gmail.com

paamj@oi.com.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Av. Dom Jose Gaspar, 500 - Coração Eucarístico, CEP 30535-901, Belo Horizonte, M.G., Brasil

Renata Diniz Viana

rdinizviana@gmail.com

ICEI, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Anel Rodoviário Km 23,5 - Rua Walter Ianni, 255 - São Gabriel, CEP 31980-110, Belo Horizonte, M.G., Brasil

Resumo. *Este trabalho apresentará uma metodologia de elaboração, busca e escolha de torres eólicas treliçadas com mais de 100 metros de altura e 700 barras na sua estrutura, que atendam aos requisitos e restrições impostas. Para isso, um algoritmo genético foi empregado, possibilitando uma redução do custo de construção. Resultados demonstraram a eficiência da metodologia desenvolvida.*

Palavra-chaves: *Torre Treliçada, Otimização estrutural, inteligência artificial, Algoritmo Genético.*

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é a energia que necessita do vento e pode ser transformada em energia elétrica através de turbinas eólicas. Os primeiros casos relatados de utilização do vento foram barcos veleiros, utilizado também em moinhos de vento com a finalidade de moer grãos. A capacidade de geração de energia de uma torre, está ligado dentre outros fatores, a sua altura. Quando maior é a torre, maior será a força do vento nas pás que impulsionará o rotor. Por consequência, maior será a estrutura da torre para suportar maiores cargas de vento e de seu próprio peso. O presente trabalho visa atender à uma demanda de construção de parques eólicos em regiões montanhosas, como encontradas no estado de Minas Gerais no Brasil, que apresentam um determinado grau de dificuldade de acesso para o transporte das torres. Para isso, uma nova abordagem de geração, validação e otimização de torres treliçadas, será empregada com o auxílio de rotinas de inteligência computacional para busca da torre com mais de 100 metros com o menor custo de construção e fabricação possível. Para viabilizar a construção de parques eólicos a região deverá possuir ventos médios de 13 km/h, sendo suficiente para girar a turbina e por consequência a geração de energia elétrica. A figura 2 mostra detalhadamente os itens de uma turbina eólica utilizada atualmente.

2 Referencial Teórico

A otimização estrutural feita em [Olhoff, Bendsøe e Rasmussen 1991], teve como objetivo era realizar uma redução no volume de material, permanecendo a rigidez da estrutura. [Ribeiro 2008] desenvolveu um programa de otimização estrutural de treliças planas de madeira utilizando AG, utilizando o programa GESTRUT para análise de deslocamentos e esforços na estrutura. O objetivo do trabalho era encontrar a melhor forma de distribuição dos componentes da estrutura. [Coutinho 2006] propôs uma otimização estrutural e definição topológicas em problemas 3D utilizando método de elementos finitos. [Fonseca 2007], que utilizou AG e redes neurais artificiais, realizando otimização dimensional, topológica, forma em algoritmos separadamente, como etapa do pré-processamento do algoritmo que realizava a otimização simultânea. [MOURA 2009] utilizou como base o trabalho de [PEREIRA 2007] para otimização estrutural de treliças planas com coordenadas nodais móveis e fixas. [Pereira 2013] realizou o processo de ajuste de parâmetros dos algoritmos evolutivos apresentados por [MOURA 2009]. [Martins 2011] aplicou análise de elementos finitos para otimização de treliças, obedecendo restrições como flexibilidade, tensão e tensão flambagem local, em treliças com 10, 23 e 47 barras. O trabalho apresentou melhores resultados com treliças com somente 10 barras, em relação aos trabalhos de [Haftka e Kamat 1985] e [Souza e Fonseca 2008]. [Sirqueira 2008] estudou o comportamento estrutural de uma torre tubular para suporte de turbinas eólicas utilizando elementos finitos. Os comportamentos estático não-linear e dinâmico foram estudados através da aplicação de carregamento que simulam a ação do vento sobre as pás da hélice da torre analisada. Resumidamente o trabalho abrangeu: análises lineares do comportamento estático da torre; modelagem dinâmica para diversos tipos de análise, como harmônica e a transiente e por fim, uma análise não-linear física e geométrica foi realizada. Com base neste trabalho, [Ferreira 2012] realizou um estudos de análise estática e dinâmica de torres treliçadas para suportar turbinas eólicas, utilizando para avaliação Método de Elementos Finitos. A análise estática foi empregada com o intuito de avaliar do comportamento estrutural da torre, já a análise dinâmica teve como foco à verificação da performance da torre. Nos estudos realizados a torre

construída teve como base as torres de redes de alta tensão, com 80m de altura e uma velocidade média dos ventos de 10m/s. Com os dados apresentados, [Filho 2014] realizou várias otimizações e conseguiu reduzir o peso da torre de 270 toneladas para 140 toneladas. Como características das melhores torres obtidas, cita-se que sua inclinação esta em torno de 84° com o solo, e as barras secundarias formam ângulos de 31° com as 4 barras laterais principais.

3 Otimização Estrutural

Uma ilustração da metodologia proposta neste projeto pode ser vista na Figura 1:

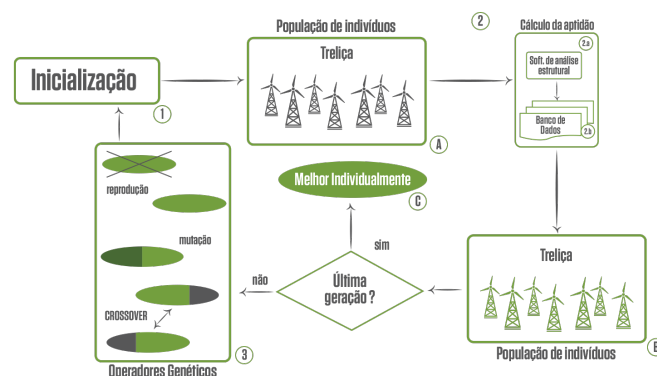


Figura 1: Esboço da metodologia proposta.

Fonte: Dados da pesquisa.

No primeiro passo da metodologia são informados alguns parâmetros necessários para a otimização estrutural de torres treliçadas. Ao receber os parâmetros informados, como o tamanho da população, taxa de elitismo, mutação e as características relacionadas ao local da torre, e suas características estruturais como: altura e porte da torre, custo máximo permitido para a construção, velocidade do vento na região de instalação da torre. Esses valores são armazenados para serem utilizados ao longo da execução do programa. Sendo assim esses parâmetros são passados para o algoritmo genético, que gera uma população inicial que atenda aos parâmetros informados. No segundo passo é executado o método de análise estrutural. Neste passo, para cada indivíduo gerado, são realizadas análises para verificar o quão próxima do ideal a estrutura da torre é, levando em consideração os parâmetros informados inicialmente e, na media que novos processos estruturais forem sendo gerados, estes serão armazenados na base de dados para futuras análises estruturais geradas no software. Com isso no item B da Figura 6 para cada indivíduo, o AG retorna o valor de aptidão. Após a verificação da aptidão dos indivíduos da população, é feita uma averiguação se existe alguma outra geração de novos indivíduos. Em caso negativo, o melhor indivíduo, ou seja, o indivíduo com maior valor de aptidão é selecionado, e a torre treliçada é gerada com os dados estruturais presentes nos genes do indivíduo que contenha as característica da torre com o menor custo e maior altura. Em caso positivo, no passo 3, são executadas operações de cruzamento, reprodução, mutação e exclusão dos indivíduos para que seja formada uma nova população.

Para cada torre gerada no processo evolutivo do algoritmo genético, é realizado a verificação do deslocamento máximo Equação (1) e a carga crítica 2.

$$\delta_{max} = \frac{h}{50}, \quad (1)$$

em que h é a altura da torre.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (2)$$

E = módulo de elasticidade longitudinal do material, I = menor momento de inércia da área da seção transversal e L = comprimento de flambagem da peça.

3.1 Custo de construção de torre treliçada

Todas as torres geradas no processo de geração das torres candidatas, suas estruturas são analisadas e é verificado o custo de construção para cada torre. O custo relacionado as torres diz respeito ao processo de fabricação, montagem e transporte até ao local de instalação. Sendo assim o custo total obtido para cada torre pode ser descrito da seguinte forma:

Número de barras (N_m), podem ser definidas na Equação 3:

$$C_m = \sum_{i=1}^{N_m} k_m + K_{mm} p A_i L_i \quad (3)$$

Em que K_{mm} é o custo do aço (\$/ton), p é a unidade de peso do aço (ton/m), A_i é a área da seção transversal e L_i o comprimento do membro, K_m como sendo o custo para corte, pintura e preparação da barra. Número de nós (N_n), definimos como 4:

$$C_n = \sum_{i=1}^{N_n} k_n + j_i h d t f \quad (4)$$

em que K_n é o custo do material e de instalação por parafuso (\$), N_n é o número total de nós, h é a altura, d o comprimento, t a espessura das sapatas, f o custo do material (aço de reforço e concreto) para os alicerces (\$/m3) e j_i é o número de parafuso. Número de apoios ou bases (N_b), onde é considerado a base da torre e as suas fundações, podemos definir como 5:

$$C_b = K_b N_b \quad (5)$$

em que K_b é o custo unitário por fundação da torre. Número de tipos de seções transversais das barras (N_t), em que é considerado o custo de operação de montagem da torre, tendo como base perfis já padronizados por fabricantes, sendo assim 6:

$$C_t = K_t N_t \quad (6)$$

Em que (K_t) é o custo estimado por se utilizar um dado perfil de um fabricante. Número de barras que chegam em um nó (N_{nm}), onde se leva em conta que é mais complexo montar um nó em que muitas barras estão chegando, e um nó com poucas barras se apresenta mais estável, podemos definir como:

$$C_{nm} = \sum_{i=1}^{N_n} k_{nm} N_{nm} \quad (7)$$

em que o custo para montagem da barra no nó da torre é representado por K_{nm} . O ângulo

de inclinação das barras que chegam em um nó (θ_{nm}), onde é considerado a facilidade de montagem, construção e manutenção quando o ângulo entre as barras são de 0° , 90° e 180° , o custo é bem menor e aumenta o custo para outros ângulos de intercessão, conforme visto na Equação 8:

$$C_\theta = K_\theta \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_{nm}} \sqrt[6]{[\theta_{ij}(90 - \theta_{ij})(180 - \theta_{ij})]^2} \quad (8)$$

Em que K_θ é custo de montagem das barras em um determinado ângulo, θ_{ij} é o menor ângulo entre duas barras interligadas em um nó da torre, variando entre 0 e 180 graus. A função custo total é definida na Equação 9.

$$C = C_m + C_n + C_b + C_t + C_{nm} + C_\theta \quad (9)$$

4 Resultados

As forças atuantes sobre a torre foram configuradas e ilustradas nas Figuras 2 e 3.

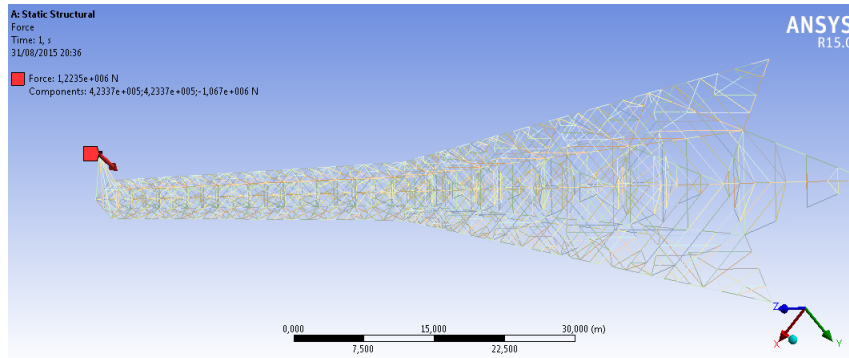


Figura 2: Ilustração das forças atuantes na torre.
Fonte: Dados da pesquisa.

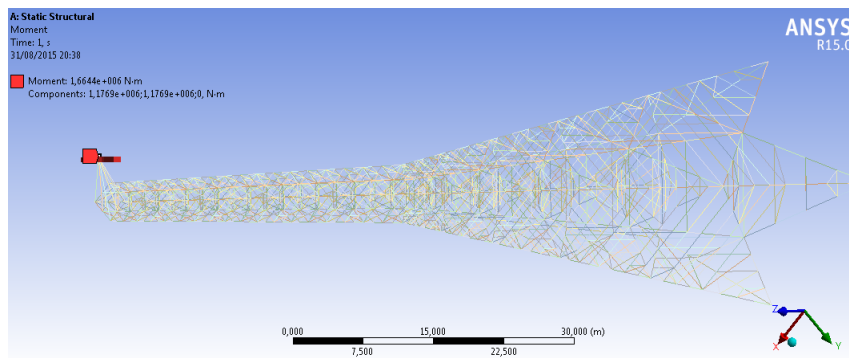


Figura 3: Ilustração da configuração do momento .
Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados obtidos com a análise de flambagem podem ser vistas nas figuras 4.

A análise de deformação total da torre pode ser vista na Figura 5:

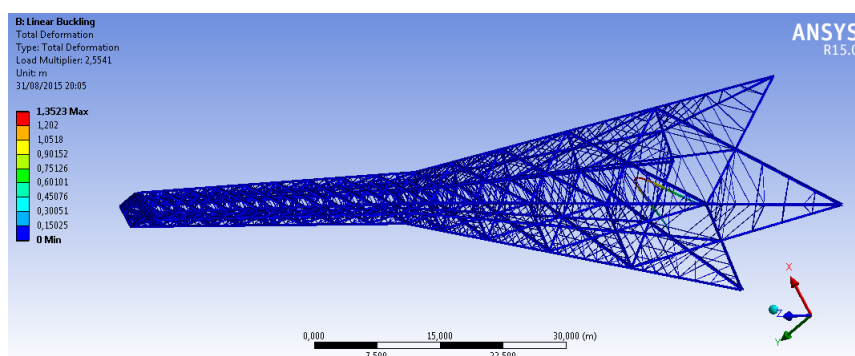


Figura 4: Ilustração da análise de flambagem .
Fonte: Dados da pesquisa.

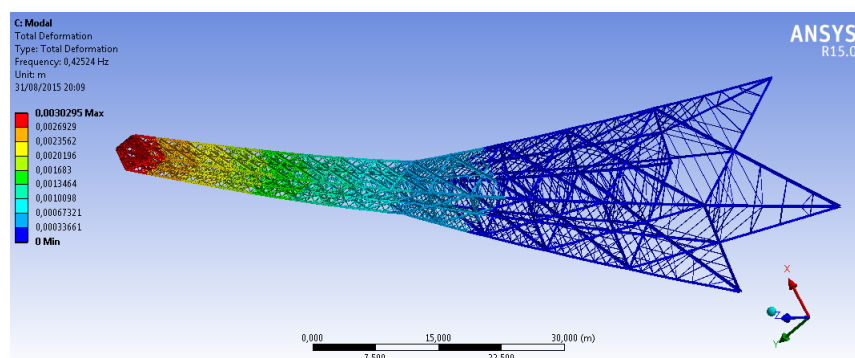


Figura 5: Ilustração da configuração do momento .
Fonte: Dados da pesquisa.

5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo demonstrar uma metodologia de elaboração e escolha de torres treliçadas para suportar aerogeradores de grande porte. Um dos grandes problemas encontrados na literatura é de manipulação dos elementos de torres com mais de 700 barras. A formulação dos cálculos de custos foram citadas e a torre com o menor custo foi apresentanda, assim como as cargas aplicadas. As análises estáticas e dinâmicas lineares foram estudados através da aplicação de carga para simular a ação do vento sobre as pás da hélice. Os resultados de análise estrutural comprovaram a eficiência da torre gerada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio generoso da PontificiaUniversidadeCatolica de Minas Gerais - PUCMinas, o Conselho Nacional de DesenvolvimentoCientifico e Tecnológico - CNPq - "Conselho Nacional de Tecnológico e Científico Desenvolvimento "e da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG - "Fundação para Apoio à Pesquisa de Minas Gerais ".

Referências

- [Coutinho 2006]COUTINHO, K. D. *Método de otimização topológica em estruturas tridimensionais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, out. 2006.
- [Ferreira 2012]FERREIRA, T. S. *COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE TORRES TRELIÇADAS AUTOPORTANTES DE AÇO PARA SUPORTE DE TURBINAS EÓLICAS*. 101 p. Dissertação (Mestrado) — PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS, 2012.
- [Filho 2014]FILHO, O. A. d. C. *OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES TRELIÇADAS AUTOPORTANTES PARA AEROGERADORES DE GRANDE PORTE*. 167 p. Dissertação (Mestrado) — PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS, nov. 2014.
- [Fonseca 2007]FONSECA, M. da. *Otimização de estruturas treliçadas planas e espaciais sob carregamentos estáticos e dinâmicos, usando algoritmos genéticos e redes neurais*. 212 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil, ago. 2007.
- [Haftka e Kamat 1985]HAFTKA, R.; KAMAT, M. *Elements of structural optimization*. M. Nijhoff, 1985. (Mechanics of Structural Systems). ISBN 9789024730629. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=7MVRAAAAMAAJ>>.
- [Martins 2011]MARTINS, T. F. A. *Otimização de estruturas de treliças utilizando técnicas de programação linear*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, dez. 2011.
- [MOURA 2009]MOURA, J. G. D. *USO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS HÍBRIDOS EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TRELIÇAS*. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, 2009.
- [Olhoff, Bendsøe e Rasmussen 1991]OLHOFF, N.; BENDSØE, M. P.; RASMUSSEN, J. On CAD-integrated structural topology and design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 89, n. 1–3, p. 259–279, 1991. ISSN 0045-7825. Second World Congress on Computational Mechanics. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782591900447>>.
- [Pereira 2013]PEREIRA, A. d. S. *Melhoria do desempenho de Algoritmos Evolutivos a partir do ajuste automático de seus parâmetros internos*. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, 2013.
- [PEREIRA 2007]PEREIRA, J. P. G. *HEURÍSTICAS COMPUTACIONAIS APLICADAS À OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TRELIÇAS BIDIMENSIONAIS*. Dissertação (Mestrado) —

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2007.

[Ribeiro 2008]RIBEIRO, L. M. P. *OTIMIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS PLANAS DE MADEIRA EMPREGANDO O MÉTODO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS*. 120 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, fev. 2008.

[Sirqueira 2008]SIRQUEIRA, A. d. S. *COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE TORRES DE AÇO PARA SUPORTE DE TUBIRNAS EÓLICAS*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia, 2008.

[Souza e Fonseca 2008]SOUZA, R. P. de; FONSECA, J. S. O. Optimum Truss Design under Failure Constraints Combining Continuous and Integer Programming . *International Conference on Engineering Optimization*, jun. 2008.