



OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES METÁLICAS PARA SUPORTE DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZANDO A INTERFACE MATLAB-ANASYS

Fernando Gonçalves Mendonça

fgm1991@gmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM/FEN/UERJ

Rua Fonseca Teles, Nº 121, São Cristóvão, 20940-903, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Francisco José da Cunha Pires Soeiro

José Guilherme Santos da Silva

soeiro@uerj.br

jgss@uerj.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Com base no aumento significativo do consumo de energia e na progressiva degradação do meio ambiente, a energia eólica tem sido considerada uma excelente opção como fonte alternativa de energia. Considerando-se que os geradores eólicos geralmente têm sido projetados e construídos no Brasil com base no emprego de estruturas de aço e têm se tornado cada vez mais robustos; e, ainda, levando-se em conta que as torres de aço empregadas para o suporte dos aerogeradores representam uma parcela significativa do custo total de um complexo eólico, destaca-se que a otimização destes sistemas estruturais constitui-se em tarefa relevante. Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo a otimização estrutural de uma torre eólica de aço, com 78,1m de altura, correspondente ao modelo MM92 da Repower, buscando-se minimizar o volume total de aço utilizado no projeto estrutural. Neste trabalho é utilizada uma técnica de otimização estrutural, com base no emprego de Algoritmos Genéticos (AG), por meio de uma adequação das interfaces entre os softwares ANSYS e MATLAB. Os resultados obtidos ao longo da investigação mostram que através do uso dos Algoritmos Genéticos (AG) torna-se possível obter reduções significativas em relação ao volume de aço utilizado no projeto estrutural de torres eólicas.*

Palavras-chave: *Torres eólicas, Otimização estrutural, Análise dinâmica de estruturas.*

1 INTRODUÇÃO

Produção de energia em larga escala, é, sem dúvida, uma dos maiores desafios desse século. O impacto do desenvolvimento tecnológico acelerado no meio ambiente, assim como o crescimento populacional, têm criado expectativas negativas com relação aos impactos ambientais e à demanda por recursos naturais limitados. A sustentabilidade da energia no futuro depende de como o problema das fontes de energia renováveis serão tratadas com o decorrer das décadas. A energia eólica é a fonte de energia que vem crescendo com maior intensidade no mundo.

A utilização da energia eólica comporta numerosas vantagens para a sociedade em geral, face às energias tradicionais e mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis. O Brasil se encontra entre os dez países que mais produzem energia eólica no mundo. Atualmente conta com 7,3% de sua matriz energética proveniente da energia eólica.

Levando em consideração um complexo eólico completo, sabe-se que os custos das torres de sustentação das turbinas eólicas representam 20-30% do valor total. Portanto, reduzir o volume das torres pode representar uma economia significativa. Sabe-se, também, que torres de aerogeradores estão sujeitas a cargas estáticas e dinâmicas, além de outras propriedades que devem ser levadas em consideração. Através de processos de otimização é possível tratar problemas desta magnitude.

A palavra otimizar tem o sentido de melhorar o que já existe, projetar algo novo com mais eficiência e menor custo, ou, então, obter o melhor resultado sob determinadas circunstâncias. A otimização visa determinar a melhor configuração do projeto sem ter que testar todas as possibilidades. No design, na construção e na manutenção de qualquer projeto de engenharia, engenheiros precisam tomar decisões técnicas e gerenciais durante diversas etapas. O objetivo final de todas as decisões pode ser tanto para minimizar o esforço necessário quanto para maximizar um benefício.

Este trabalho tem como objetivo principal a apresentação de um modelo para otimização de torres de aço tubulares, compostas de segmentos em troncos de cone destinadas a turbinas eólicas, a partir da redução de seus volumes. Foi utilizada uma técnica de otimização baseada nos Algoritmos Genéticos (AGs) com o desenvolvimento de uma interface entre os softwares MATLAB e ANSYS para a resolução do problema.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são técnicas estocásticas de busca e otimização, baseados nos princípios da genética e da seleção natural. Os AGs são inspirados na teoria de Darwin, ou seja, são técnicas de buscas baseadas na teoria da evolução, combinando a sobrevivência dos mais aptos com a troca de informações de uma forma estruturada, onde um problema do mundo real é modelado através de um conjunto de indivíduos que são soluções potenciais que melhor se ajustam ao ambiente. A cada geração de indivíduos, a seleção natural favorece a permanência das características adaptadas, constantemente melhoradas.

O objetivo específico deste trabalho foi a otimização da torre de uma turbina eólica MM92 da Repower, utilizando a técnica de otimização desenvolvida. O volume da torre foi minimizado, a partir da redução das espessuras, respeitando as restrições de deslocamento máximo, tensão máxima suportada e frequência natural. Os cálculos estruturais e as restrições de projeto são baseados nas normas EUROCODE 3, NBR 8800 e NBR 6123.

2 CARACTERÍSTICAS DA TORRE INVESTIGADA

O aerogerador MM92 da Repower é um conversor de energia eólica, presente em diversos países como Espanha, Portugal e Alemanha, com uma potência de geração de 2,050 kW. A produção de energia se inicia a partir de uma velocidade de 3 m/s e é interrompida quando atinge uma velocidade de 24 m/s. Seu rotor possui diâmetro de 92,5 m com um sistema elétrico de rotação individual de pás, e sua velocidade varia entre 7,8 e 15,0 rpm ($\pm 12,5\%$). A turbina possui três pás e cada uma tem 45,2 m de comprimento e 5 m de altura, e são fabricadas em resina plástica reforçado com fibra de vidro (GRP). A Figura 1 ilustra a turbina MM92 e seus componentes externos.



Figura 1- Parte superior do modelo MM92

A torre estudada nesse trabalho é dividida em três segmentos. O primeiro possui uma altura de 21,77 m, diâmetro na base de 4,30 m e no topo de 3,917 m, o segundo uma altura de 26,62 m, diâmetro na base de 3,917 m e no topo de 3,45 m e, finalmente, um terceiro com altura de 27,70 m com diâmetro na base de 3,45 m e no topo de 2,96 m, totalizando uma altura de 76,20 m. O material utilizado na fabricação da estrutura é o aço S355, com um limite de escoamento de 355 MPa.

O sistema de ligação das três partes que constituem a torre é feita por aparafusamento. Na ligação das partes da torre surgem os enrijecedores, em decorrência da espessura dos flanges de ligação ser superior ao da parede da torre. A Figura 2 representa de forma esquemática o sistema de ligação utilizado na torre e, uma das suas aberturas. No modelo MM92, existem duas aberturas, uma maior para acesso interno e outra para ventilação, ambas as aberturas têm o formato de uma elipse com enrijecedores perpendiculares.

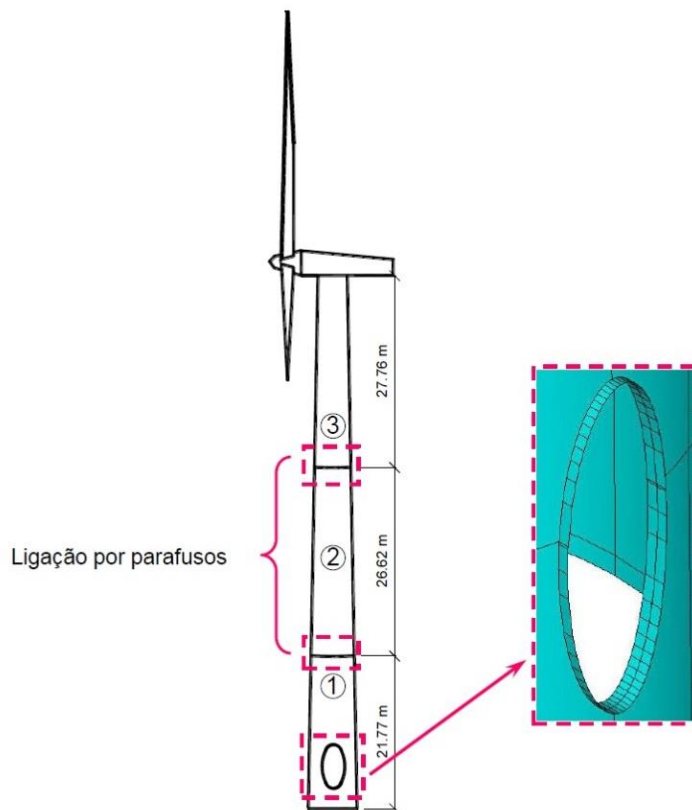


Figura 2 - Esquemas de ligação e do enrijecedor

3 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Os modelos numéricos foram elaborados com base no método dos elementos finitos utilizando-se elementos de casca SHELL181 presente na biblioteca de elementos do programa ANSYS. Este elemento é adequado para a análise de estruturas compostas por cascas que apresentem espessuras finas e médias. O elemento SHELL181 é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z. Nos modelos numéricos, as condições de contorno da torre de aço, foram simuladas pela restrição do grau de liberdade apropriado, sendo considerado o impedimento da rotação e translação dos eixos X, Y e Z, ou seja, uma base engastada.

As malhas dos modelos de elementos finitos foram definidas através de testes de validação de modelagem. Ou seja, a análise modal dos modelos foi realizada com diversas densidades de malhas até se obter um resultado convergente com o resultado experimental, permitindo uma boa representação do comportamento estrutural [9]. Para os modelos da torre, as malhas apresentaram resultados satisfatórios com dimensões 0,5 m, apresentando 16984 nós, 17010 elementos finitos de casca SHELL181. Na modelagem das aberturas das portas foram consideradas todas as suas características geométricas, conforme Figura 3.

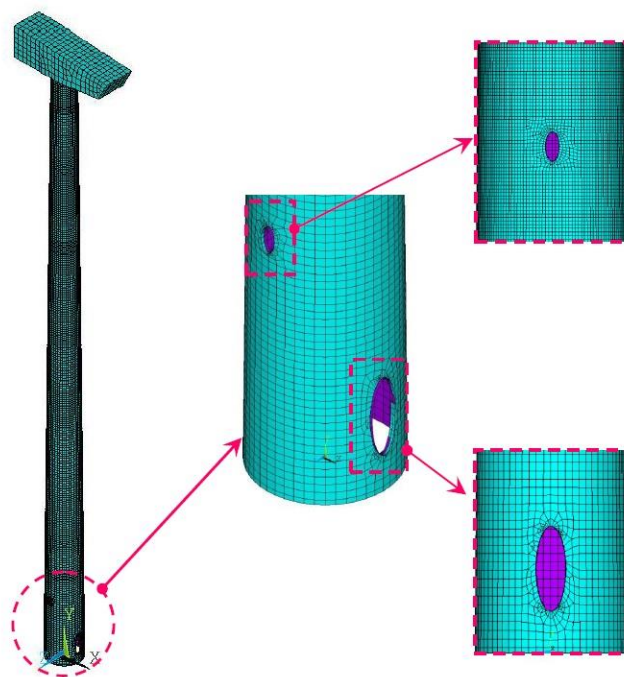


Figura 3 - Malha de elementos finitos da torre

4 ANÁLISES ESTRUTURAIS

Durante o processo de otimização, neste trabalho, são realizadas duas análises: estática e modal. A análise estática é realizada com o objetivo de calcular a tensão máxima suportada pela torre e seu deslocamento máximo no topo, devido às cargas de vento atuantes e seu peso próprio. Já a análise modal, tem objetivo de calcular as frequências naturais da torre de modo que se possa analisar os possíveis problemas de amplificação dinâmica gerados por excitação externa. Os cálculos das cargas de vento foram realizados com base na norma NBR 6123.

Neste estudo foi considerado apenas o efeito estático oriundo da ação do vento na estrutura da torre, nas pás e na nacele. Além disso, nos cálculos o peso próprio da torre foi considerado como uma carga distribuída por unidade de comprimento, e o peso de todos os equipamentos mecânicos e elétricos concentrados no topo da torre. A Figura 4 ilustra os carregamentos atuantes na torre que foram levados em consideração.

A Figura 4-b representa de forma simplificada a ação do vento empregada. A ação do vento sobre as pás da hélice e sobre a estrutura da torre pode ser vista como um carregamento distribuído ao longo da área de atuação (Figura 4-a). Para simplificar, porém mantendo coerência nos resultados, adotou-se uma força resultando atuando no centro do rotor.

Os coeficientes de ponderação dos esforços solicitantes são tratados segundo as considerações da NBR 8800. Quando o cálculo dos esforços atuantes é realizado em regime elástico linear, os coeficientes de ponderação podem ser aplicados tanto à ação característica quanto diretamente ao esforço característico.

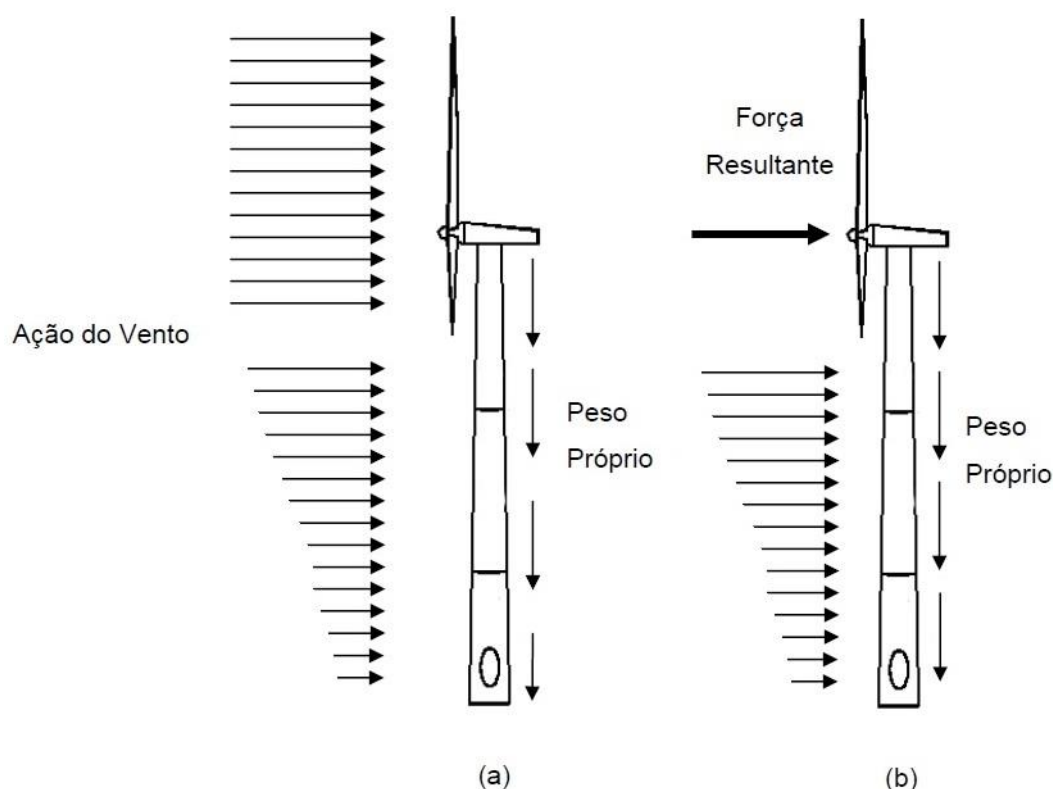


Figura 4 - Representação das cargas atuantes na torre

4.1 Análise Estática do Modelo

Utilizando o software ANSYS a análise estática foi executada. Os resultados para o modelo original da torre são informados na Tabela 1. Seguindo as recomendações da NBR 8800, as cargas de vento e o peso próprio do sistema torre-nacele foram ponderados:

- As ações permanentes $\gamma_g = 1,25$, a partir do valor para peso próprio de estruturas metálicas em situação desfavorável.
- As ações variáveis $\gamma_q = 1,40$, a partir do valor da ação do vento.

A Tabela 1 mostra um comparativo entre os resultados da análise estática da torre com e sem a ponderação das cargas

Tabela 1 - Resultado comparativo das análises estáticas

Tensões e Deslocamentos	Sem Ponderação	Com Ponderação
σ_{max}	97,3 MPa	134,1 MPa
δ_{max}	0,36 m	0,51 m

A Figura 5 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises ao longo da torre, provocada pela ação de um carregamento aplicado no centro do rotor. Nesta análise observa-se que a maior tensão (97,3 MPa) foi obtida junto à abertura da porta da torre

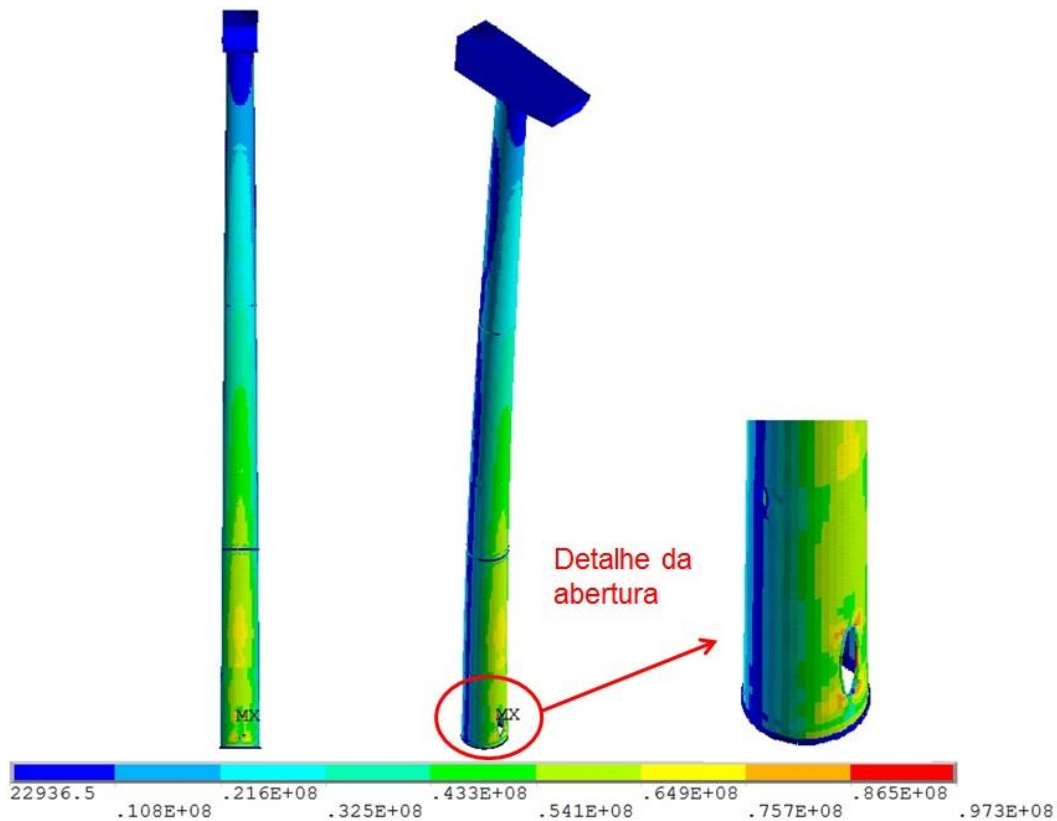


Figura 5 - Distribuição das tensões de Von Mises (em MPa)

4.2 Análise Modal da Torre

A análise modal da torre foi executada utilizando-se o software ANSYS. Os resultados obtidos através da análise numérica do modelo da torre são exibidos na Tabela 2. Cabe ressaltar que foram analisados os seis primeiros modos de vibração da torre e foi verificado que os valores das frequências naturais correspondentes aos dois primeiros modos de vibração do sistema possuem o mesmo valor, com predominância dos efeitos de flexão.

Tabela 2 - Frequências naturais da estrutura

Frequência Natural	Análise Numérica (Hz)
f_{01}	0,36
f_{02}	0,36
f_{03}	2,59
f_{04}	2,64
f_{05}	2,88
f_{06}	5,93

5 NORMAS E RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

O problema de otimização tratado neste trabalho levou em consideração as seguintes restrições de projeto: tensão máxima suportada pela torre; deslocamento máximo no topo da torre; frequências naturais da torre.

A norma NBR 8800 recomenda que a resistência característica do material seja ponderada. Nesse caso, o valor considerado foi o limite de escoamento (f_y) do aço S355 utilizado na fabricação da torre. Portanto, o valor da tensão máxima suportada pela estrutura deve ser inferior à resistência de cálculo. Neste caso, utilizando um coeficiente de ponderação $\gamma_m = 1,35$ (aço estrutural – ruptura), tem-se que:

$$\sigma_{adm} = \frac{f_y}{\gamma_m} = \frac{355}{1,35} = 263MPa \quad (1)$$

A norma NBR 8800 não possui nenhuma recomendação específica para deslocamentos máximos admissíveis para o caso de torres como no modelo proposto. Deste modo, o deslocamento horizontal no topo do modelo, é tratado segundo considerações da norma europeia Eurocode 3. Para uma verificação do estado limite de utilização em torres metálica segundo a norma, o deslocamento máximo admissível no topo dessas estruturas é representado por:

$$\delta_{adm} = \frac{h}{50} = \frac{76,20}{50} = 1,52m \quad (2)$$

Durante o projeto de uma turbina eólica, é importante evitar a condição de ressonância da estrutura, que é resultante de parte dessa estrutura sendo excitada em uma de suas frequências naturais. Uma maneira de identificar pontos de convergência entre as frequências naturais e a excitação pelo rotor é utilizando o diagrama de Campbell. O diagrama ilustra as frequências naturais mais importantes da turbina, em função da frequência de rotação do rotor.

Para evitar amplificações dinâmicas, as frequências naturais do sistema não devem estar na faixa das frequências de excitação da turbina. Portanto, neste trabalho, essas frequências são:

- Frequência de excitação devido à velocidade de rotação do rotor: frequência de uma pá da turbina (1P);
- Frequência de excitação devido à velocidade de rotação do rotor, multiplicada por três: frequência da passagem de cada pá da turbina (3P).

A Figura 6 ilustra o diagrama de Campbell para a torre estudada, a partir da faixa de velocidades do rotor. As linhas indicadas representam a frequência de rotação do rotor (1P) e a frequência de passagem da pá (3P), onde P é uma abreviação para “por revolução”.

As linhas tracejadas representam os valores 1P e 3P com margens de segurança de $\pm 10\%$. Os pontos de interseção indicam as velocidades de operação que devem ser evitadas. No diagrama está indicada, também, a frequência natural do 1º modo de vibração calculado para o modelo estudado, utilizando o software ANSYS. De acordo com o diagrama apresentado na Figura 6, tem-se a seguinte relação:

$$f_{1p} + 10\% \leq f_n \leq f_{3p} - 10\% \quad (3)$$

A partir dos valores obtidos com base nas velocidades do rotor, a restrição das frequências naturais é dada por:

$$0,31 \text{ Hz} \leq f_n \leq 0,35 \text{ Hz} \quad (4)$$

Devido à faixa das frequências de excitação do rotor, apenas o primeiro modo de vibração foi afetado. Portanto, durante o processo de otimização apenas este modo será levado em consideração.

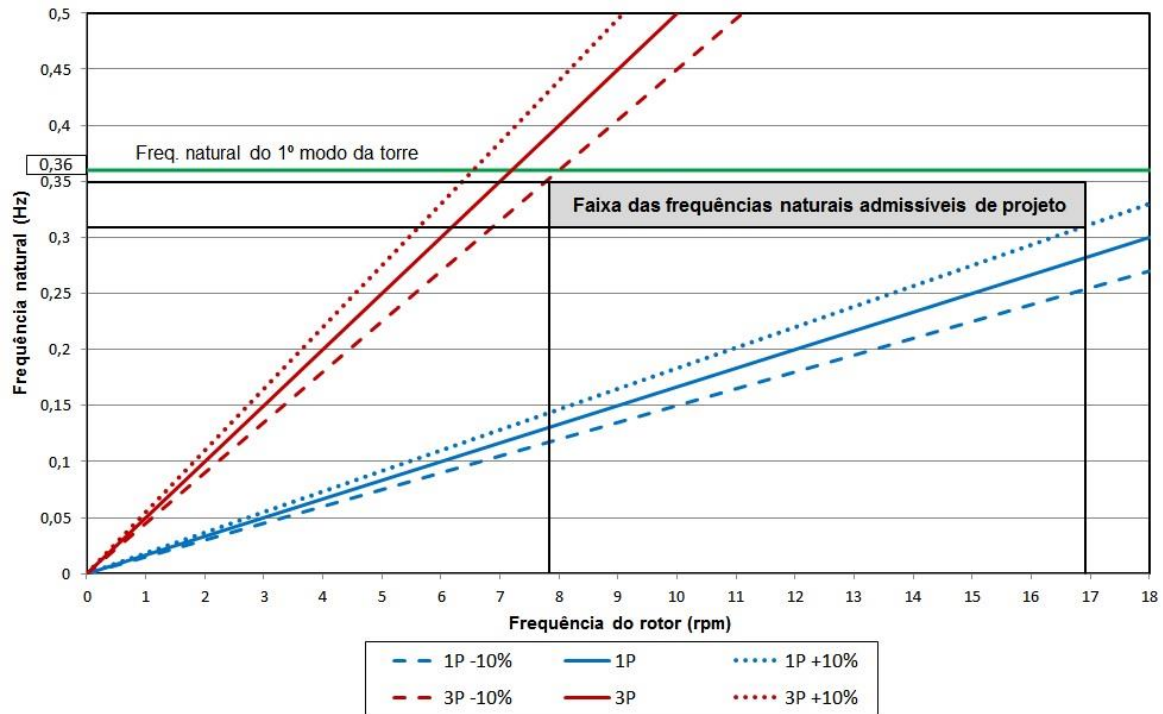


Figura 6 - Diagrama de Campbell para o aerogerador MM92

6 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

6.1 Formulação do Problema

O objetivo do problema de otimização proposto neste trabalho compreende a minimização do volume da torre MM92, com imposição de restrições relativas à tensão, ao deslocamento no topo e às frequências naturais.

Visando uma taxa de processamento reduzida durante a otimização, implementou-se no modelo numérico uma função linear, de forma que as dimensões de cada seção sejam compatíveis com a variação que ocorre na estrutura real e que a cada iteração realizada seja também garantida a linearidade da superfície da torre. Reduzindo o problema de otimização, assim, a quatro variáveis de projeto, conforme apresentado na Figura 7.

As variáveis adotadas foram as espessuras da base e do topo de cada um dos três segmentos da torre. Como as espessuras das bases dos dois últimos segmentos possuem o mesmo valor das espessuras dos topos dos dois primeiros segmentos, têm-se, dessa forma, quatro variáveis: EA, EB, EC e ED . As espessuras de cada seção da torre seguem a seguinte relação:

$$e_1 = \frac{(EA - EB)(H_1 - h_1)}{H_1} + EB \quad (5)$$

$$e_2 = \frac{(EB - EC)(H_2 - h_2)}{H_2} + EC \quad (6)$$

$$e_3 = \frac{(EC - ED)(H_3 - h_3)}{H_3} + ED \quad (7)$$

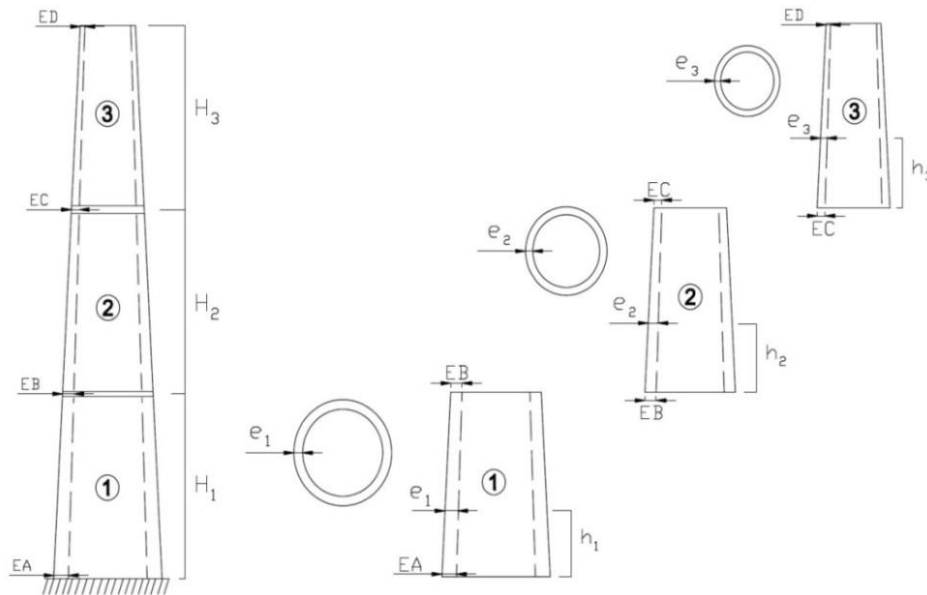


Figura 7 - Modelo representando as espessuras de cada segmento da torre

Portanto, o problema pode ser escrito como:

Minimizar

$$Vol(x) = \sum_{j=1}^s A_j L_j \quad (8)$$

Sujeito a

$$\delta_{\max} \leq 1,52m \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} \leq 263MPa \quad (10)$$

$$0,31\text{Hz} \leq f_n \leq 0,35\text{Hz} \quad (11)$$

$$0,001\text{m} \leq \mathbf{x} \leq 0,03\text{m} \quad (12)$$

Onde:

$\mathbf{x}$ representa o vetor que contém as variáveis de projeto, definido por:

$$\mathbf{x} = \{EA, EB, EC, ED\} \quad (13)$$

6.2 Interface MATLAB-ANSYS

Neste estudo foi utilizado o software MATLAB para a implementação do modelo de otimização. Analogamente, foi utilizado o software ANSYS na linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language) para a implementação dos modelos de análise estática e análise modal da torre. Devido às limitações do otimizador do software ANSYS, utilizou-se o Algoritmo Genético (AG) implementado no software MATLAB. Houve a necessidade de programar a rotina a ser operada, entretanto, foram utilizados os códigos presentes no próprio software. De maneira resumida, o MATLAB é o responsável por comandar o processo de otimização (AG), executando o ANSYS para realizar as análises estruturais a cada iteração. O INPUT são os indivíduos gerados a cada iteração do algoritmo, e o OUTPUT são os valores gerados nas análises que serão avaliados durante o processo. A Figura 8 apresenta o fluxograma do processo de otimização utilizado neste trabalho de maneira detalhada.

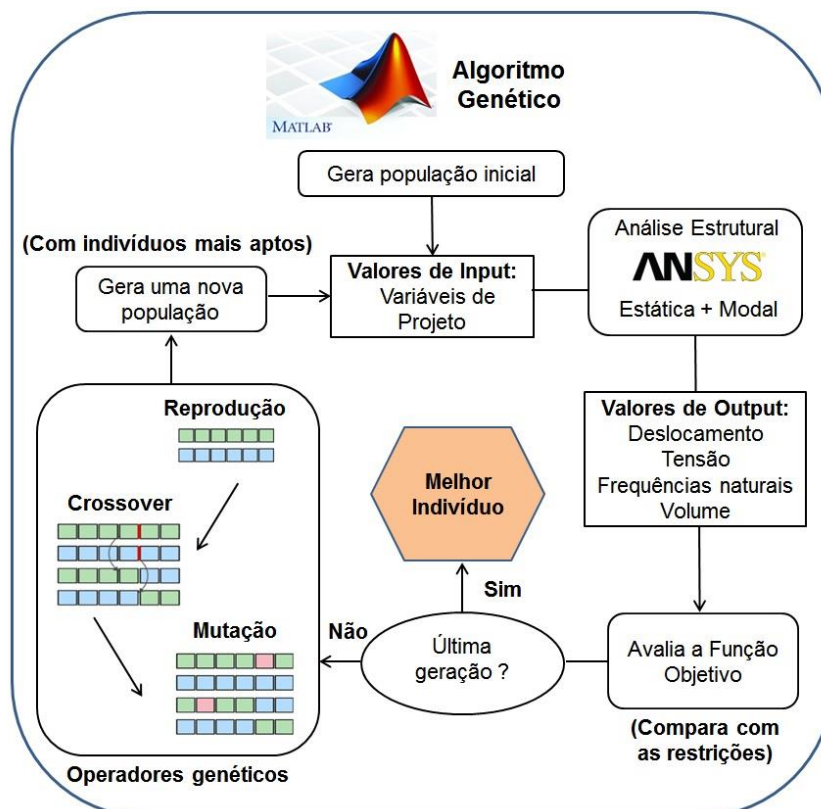


Figura 8 - Fluxograma da otimização utilizando a interface MATLAB-ANSYS

A seguir, são indicados os pontos de interface entre os softwares ANSYS e MATLAB:

1. Inicialmente, o algoritmo genético cria uma população aleatória.
2. Essa população inicial se torna um valor de input pro ANSYS.
3. O ANSYS é executado no modo batch pelo MATLAB, duas vezes – uma para realização da análise estática e outra para a análise modal -, e fornece os valores de output: deslocamento máximo, tensão máxima, frequências naturais e volume.
4. Os valores de output são avaliados pelo MATLAB, comparando-os com as restrições de projeto.
5. Os valores para a função objetivo e para as restrições gerados pelo indivíduo são verificados. Caso esteja dentro dos valores estipulados, o indivíduo é aceito. Caso contrário, o MATLAB a interpreta como valor inválido, ou seja, o indivíduo é considerado inapto.
6. O algoritmo, então, cria uma nova sequência de indivíduos se baseando nos seguintes fatores:
 - a) São integradas “pontuações” para cada indivíduo apto da população com base em seus valores da função objetivo e atendimento das restrições;
 - b) As funções objetivo com maiores pontuações são convertidas em um maior percentual de utilização em populações futuras;
 - c) Os melhores indivíduos são selecionados para reprodução da população seguinte;
 - d) Os novos indivíduos são produzidos;
 - e) A população é substituída.
7. O algoritmo para quando algum dos critérios de parada é atingido.

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram realizadas duas análises de otimização, com base nos Algoritmos Genéticos, variando o número de indivíduos e o número de gerações. O objetivo dessa variação foi verificar os resultados obtidos. Ambas possuíam os mesmos valores para as taxas de crossover e as taxas de mutação: 70% e 10%, respectivamente. Na primeira análise foram utilizados 125 indivíduos e 20 gerações. Na segunda análise, foram utilizados 140 indivíduos e 25 gerações.

Os resultados para o problema de otimização proposto neste trabalho, utilizando o AG e a interface MATLAB-ANSYS, são apresentados a seguir. A torre inicialmente, se encontra com um volume de 17,9 m³. Após o processo de otimização, foi possível ter uma redução em seu volume de 30%, apresentando um volume ótimo de 12,50 m³, conforme a Tabela 3. Essa redução de 5,41 m³ em seu volume representa uma redução em massa de 42 toneladas.

Tabela 3 - Valor da função objetivo após a otimização

	Valor Inicial	Valor Ótimo	Redução do Volume
Volume Total	17,91 m ³	12,50 m ³	30,2%

Os novos valores das variáveis de projeto EA, EB, EC e ED são comparados com seus respectivos valores iniciais na Tabela 4. É possível notar uma redução satisfatória nas espessuras da torre analisada.

Tabela 4 - Valor das variáveis de projeto objetivo após a otimização

Variáveis	Valor Inicial	Valor Ótimo
EA	30 mm	19,5 mm
EB	21 mm	15,5 mm
EC	16 mm	10 mm
ED	12 mm	8 mm

A Tabela 5 apresenta as novas espessuras obtidas para o modelo da torre MM92 com base na função linear utilizada para o cálculo das variáveis de projeto.

Tabela 5 - Valor das espessuras da torre após a otimização

Variáveis	Valor Inicial (m)	Valor Ótimo (m)
E1	0,03	0,0195
E2	0,027	0,0182
E3	0,026	0,0179
E4	0,024	0,0168
E5	0,023	0,0164
E6	0,022	0,0159
E7	0,021	0,0155
E8	0,020	0,0143
E9	0,019	0,0135
E10	0,018	0,0126
E11	0,017	0,0115
E12	0,016	0,01
E13	0,015	0,0096
E14	0,014	0,0092
E15	0,013	0,0085
E16	0,012	0,008

A Tabela 6 apresenta os valores alcançados de acordo com as restrições de otimização impostas no modelo: tensão máxima, deslocamento máximo e frequência natural. Foi feita uma comparação entre os valores admissíveis e os valores do modelo otimizado.

Tabela 6 - Valores das restrições após a otimização

Restrições	Valor Admissível	Valor Alcançado
σ_{max}	263 MPa	235 Mpa
δ_{max}	1,52 m	0,74 m
f_n	$0,31 \text{ Hz} \leq f_n \leq 0,35 \text{ Hz}$	0,31 Hz

A restrição relativa à tensão atingiu o valor de 235 MPa, equivalente a 89% do seu limite. A restrição relativa ao deslocamento máximo atingiu o valor de 0,74 m, equivalente a 48,5% do seu limite. Em relação às restrições de frequência natural, atingiu-se o seu limite inferior. Portanto, o resultado ótimo encontrado não teve nenhuma de suas restrições ultrapassadas. Pode-se perceber que dentre as restrições de projeto impostas no processo, a restrição relacionada à frequência natural teve uma influência maior.

A Figura 9 apresenta a taxa de otimização do volume da torre em função das gerações no Algoritmo Genético, mostrando o melhor valor da função objetivo para cada geração. Nota-se que a partir da 19ª geração o problema estava convergindo para o resultado ótimo.

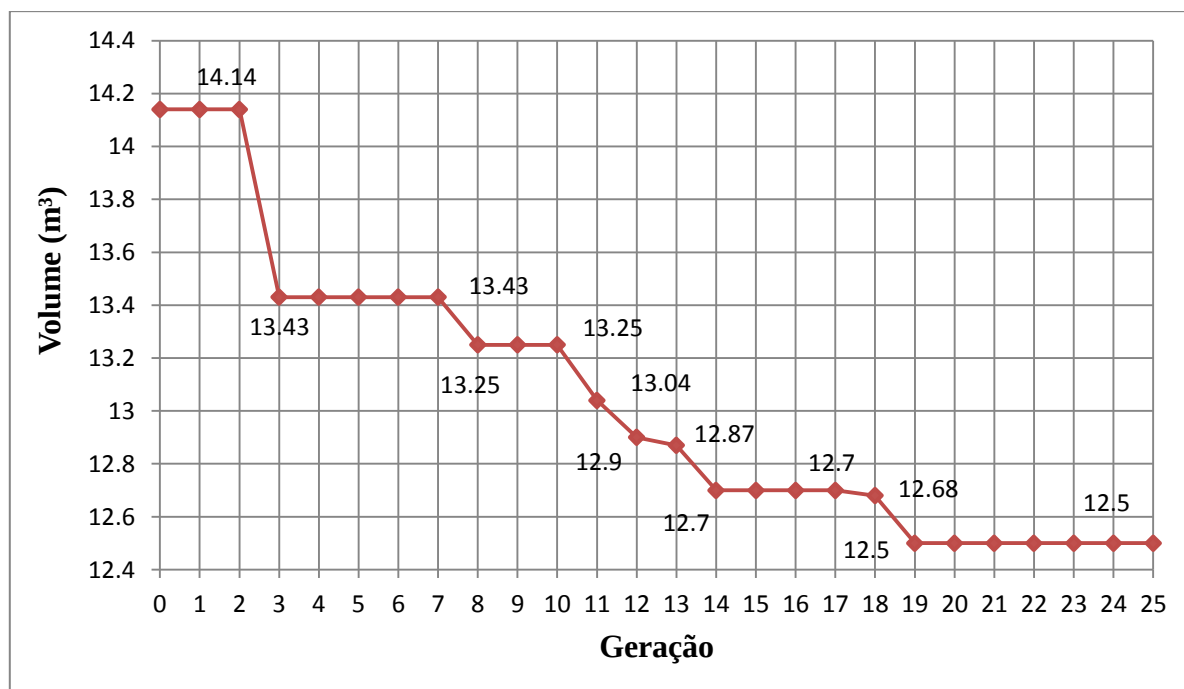


Figure 9 - Valor da função objetivo em função das gerações

A Figura 10 mostra uma comparação entre a análise com 140 indivíduos e 25 gerações e uma análise realizada com 120 indivíduos e 20 gerações. Ambas as análises atingiram o mesmo valor ótimo, apresentando taxas de convergência similares. Entretanto, na análise com 20 gerações e 120 indivíduos houve a convergência para um novo valor ótimo na ultima geração. Portanto, foi necessário aumentar o valor dos parâmetros de entrada para que valores com maior confiabilidade fossem alcançados.

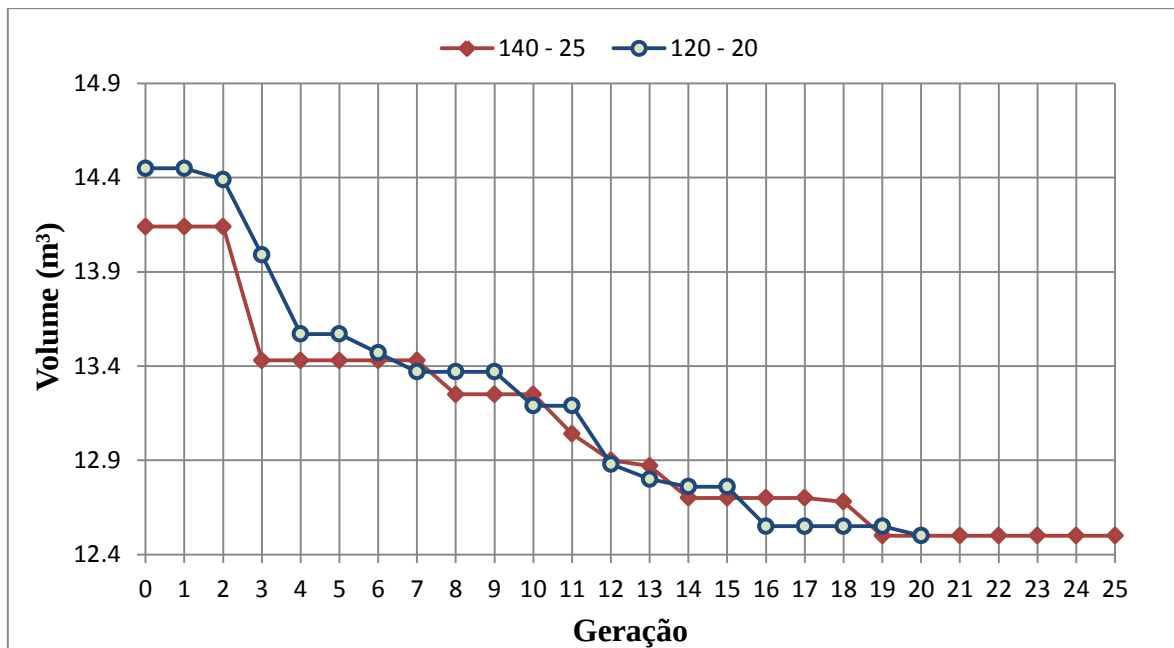


Figure 10 - Comparação dos resultados para número de indivíduos e gerações distintos

8 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho diz respeito ao desenvolvimento de um modelo para otimização da torre eólica modelo MM92 da Repower, submetida à ação do vento. Como as torres correspondem cerca de 20% a 30% do custo de um gerador eólico, realizar a otimização das torres representaria uma economia significativa para projetos de complexos eólicos. Para tal, este estudo aborda desde a formulação do problema de otimização, até a técnica utilizada: interface MATLAB-ANSYS utilizando algoritmos genéticos.

O processo de otimização realizado apresentou bons resultados. O volume da torre estudada encontrava-se inicialmente com 17,9 m³. O processo utilizando o Algoritmo Genético e a interface MATLAB-ANSYS resultou em um volume minimizado para 12,5 m³. Ou seja, houve uma diminuição de 5,4 m³, representando uma redução de 30% no volume total da torre, e, conseqüentemente, no seu peso.

A redução da função objetivo respeitou todos os limites impostos pelas restrições de projeto. Os valores atingidos para as restrições de projeto foram: 235 MPa para a tensão máxima obtida; 0,71 m para o deslocamento máximo; 0,31Hz para a frequência fundamental. Portanto, pode-se perceber que dentre as restrições de projeto impostas no processo, a restrição relacionada à frequência natural teve uma influência maior.

Cabe ressaltar a importância da inclusão das restrições de projeto no processo de otimização, assim como a ponderação das cargas. Logo, com nenhuma das restrições de projeto ultrapassadas, pode-se garantir maior segurança estrutural no projeto. A interface apresentou desempenho satisfatório, não apresentando erros, e reduzindo as variáveis de projeto até o limite imposto pelas restrições de projeto. Com essa técnica, foi possível uma redução em 30% da função objetivo. Portanto, pode-se concluir que a otimização pode representar uma economia considerável quando aplicada em projetos de complexos eólicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J.J.A., 2009. *Análise regional da energia eólica no Brasil*. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. 1990. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2008. Rio de Janeiro.
- BANIOTOPOULOS, C.C., BORRI, C., & STATHOPOULOS, T., 2011. *Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures*. CISM, Udine - Springer.
- BASTOS, E. A., 2004. *Otimização de Seções Retangulares de Concreto Armado Submetidas à Flexo-Compressão Oblíqua Utilizando Algoritmos Genéticos*. M.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Rio de Janeiro.
- BZDAWKA, K., 2008. *Structural analysis of a wind turbine tower – steel tubular towers of heights: 76.15 m and 105.0 m*. M.Sc, Poznań University of Technology.
- CASTRO, R. E., 2001. *Otimização de Estruturas com Multi-objetivos Via Algoritmos Genéticos de Pareto*. D.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- CEN, EUROCODE 3: Design of Steel Structures, Parte 3-2, Tower, masts chimneys. 2004. European Committee for Standardization, Brussels.
- FEIJÓ, B.P., 2010. *Otimização estrutural de torres de aço tubulares para geradores eólicos*. M.Sc, Universidade Federal do Ceará/ Fortaleza.
- GEWC (Global Wind Energy Council) - Global Wind Report, 2016.
- LIMA, J. B. C. A., 2011. *Contribuição para otimização estrutural de torres tubulares de aço para de turbinas eólicas*. M.Sc, Universidade Federal do Ceará/ Fortaleza.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J., & G; ROGERS, A. L., 2009. *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*. 2nd Edition. University of Massachusetts - WILEY.
- MENDONÇA, F. G., 2017. *Otimização Estrutural de Torres de Aço para Suporte de Turbinas Eólicas Utilizando a Interface MATLAB-ANSYS*. M.Sc, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/ Rio de Janeiro..
- REBELO, C., & SILVA, L. A. P. S., 2007. *Measurement Plan of a Wind Steel Tower in Espinhaço de Cão, Lagos, Algarve, Portugal*. HISTWIN – High-Strength Steel Tower for Wind Turbines. Civil Engineering Department, University of Coimbra/ Coimbra.
- SANTOS, N. A. A. S., 2013. *Otimização de Torre de Aço para Aerogerador Eólico*. M.Sc, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/ Rio de Janeiro.
- SIRQUEIRA, A. S., 2007. *Comportamento Estrutural de Torres de Aço para Suporte de Turbinas Eólicas*. M.Sc, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/ Rio de Janeiro.
- Yildirim, S., & Ozkol, I., 2010. *Wind Turbine Tower Optimization under Various Requirements by Using Genetic Algorithm*. Engineering, 2.
- YOSHIDA, P. E., 2006. *Wind Turbine Tower Optimization Method Using Genetic Algorithm*. Wind Engineering Vol 30, No 6.