



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MODELAGEM E ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE UMA TORRE ESTAIADA DE MICROGERADOR EÓLICO (SWPG)

Fernanda Gondim de Almeida¹, fernandagondimalmeida@gmail.com

Alex Sandro de Araújo Silva¹, alex.araujo@ufersa.edu.br

Márcio Furukava¹, furukava@ufersa.edu.br

Ítala Magila Martins Alves¹, italamagila@gmail.com

¹ Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas – Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.

Resumo: É crescente a utilização de microgeradores de energia eólica por usuários domésticos para complementação do fornecimento de energia. No entanto, estes sistemas precisam ser instalados em torres de, pelo menos, 9m para atingir um desempenho satisfatório. As empresas que fornecem estes equipamentos não oferecem no pacote por problemas de logística a torre de suporte, sendo a instalação desta de responsabilidade do usuário. Assim, o projeto correto e análise de uma torre para SMALL WIND POWER GENERATION (SWPG) devem ser feitas sobre as características reais de carga existente, não apenas linear e estáticas, mas carga de vento e de auto-excitação de todo o sistema. O objetivo deste trabalho é propor uma modelagem e análise em elementos finitos (MEF) de uma torre estaiada de suporte de um SWPG sob a atuação de cargas dinâmicas críticas, reconhecendo que a análise destas é fundamental para o seu desempenho estrutural. Inicialmente foi modelada uma torre de suporte de um microgerador Bergey Excel 1 usando o software comercial CAD NX 9.0, seguido de uma modelagem em MEF da torre proposta e posteriormente sua análise no mesmo ambiente computacional. Através dos resultados obtidos, verificou-se que o projeto de torre proposto tem um bom comportamento estrutural, considerando que os parâmetros de tensão máxima da torre estão dentro dos limites de tensão admissíveis. Desta forma, o modelo analisado reuniu critérios de resistência e estabilidade da estrutura dentro do que é permitido, garantindo a segurança e eficiência do projeto, destacando que os estais foram essenciais para a validação do projeto proposto

Palavras-chave: Torre Estaiada, Microgerador Eólico, Método dos Elementos Finitos, Simulação, NX 9.0

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a geração de energia eólica tem sido objeto de estudo desde a década de 1970, principalmente no que se refere ao aproveitamento energético. Esse potencial energético vem vivenciando um progressivo crescimento nas últimas décadas, que se repercute no país de forma expressiva.

Nesse contexto, a utilização desse bem natural ocorre, conforme Sant'anna (2009), através da sua conversão em energia de rotação por meio de aerogeradores. Em se tratando da estrutura desses aerogeradores, como bem aduz Amaral (2013), a torre que compõe a turbina é um componente estrutural que mantém os demais componentes no alto, como o rotor, a nacelle e o gerador. Assim, ela deve ser resistente aos carregamentos constantes (peso próprio da torre e da turbina), bem como as ações do vento, uma vez que estes podem induzir vibrações prejudiciais à estrutura do aerogerador.

Consoante Rivera (2013), as torres, em conformidade com as dimensões do aerogerador, podem ser classificadas como autoportantes ou estaiadas, reticuladas e tubulares. Entretanto, o presente estudo considera apenas a classificação de torres estaiadas, as quais são formadas por sistemas estruturais cuja estabilidade é assegurada por um conjunto de cabos de aço tensionados (estais). Torres desse tipo são empregadas em aerogeradores de pequena potência e são amplamente utilizados para sanar projetos que requeiram grandes alturas. Entretanto, essas torres apresentam como desvantagem a área que ela ocupa, em razão da ancoragem dos estais.

Com o avanço da tecnologia, pequenos proprietários de terras usam cada vez mais os Geradores Eólicos de Pequena Potência (SWPG) para suprir suas necessidades particulares. Em contrapartida, as empresas que fornecem estes equipamentos não oferecem a torre no pacote por questões logísticas, já que para esses geradores alcançarem um desempenho satisfatório, sua seção longitudinal deve ter no mínimo 9 m. A torre passa a ser então, de responsabilidade do usuário. Diante de tal fundamentação, é factível a realização de estudos, desde a adequada concepção da torre (modelagem), até a realização de análises dinâmicas dos esforços críticos reais, como a auto-excitação do SWPG. E sendo

as ações do vento um dos pontos mais importantes a se definir em projetos de estruturas, analisar tridimensionalmente o comportamento da torre sob a ação dos carregamentos provenientes do vento através do modelo de Strouhal.

Compreendendo as informações supracitadas, percebe-se a importância de uma análise dinâmica do elemento estrutural em questão, a torre, através da modelagem e simulações da mesma, utilizando o software comercial CAD-NX 9.0. Portanto, a presente pesquisa tem por objetivo propor uma torre metálica estaiada de seção tubular, para sustentação de SWPG, permitir o domínio do conhecimento nesta área e viabilizar processos de produção através da investigação e verificação do desempenho da torre proposta quanto a fatores preponderantes às condições de funcionamento da estrutura da mesma, tais como carregamentos permanentes e oriundos do vento, vibrações induzidas pelo escoamento do fluido, frequências naturais, tensões de Von Mises, deslocamentos horizontais e forças de reação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fundamentos da aerodinâmica a serem considerados na análise

Para a realização das análises, é válida a compreensão dos parâmetros aerodinâmicos envolvidos no estudo, sendo estes descritos em sequência.

2.1.1 Número de Strouhal

Este parâmetro é utilizado para descrever a frequência de desprendimento de vórtices, numa dada seção da estrutura, e, depende comumente do número de Reynolds e da geometria da seção. A Equação 1 é dada por:

$$S_t = \frac{f_s \cdot D}{V} \quad (1)$$

Onde (PINHEIRO, 2004): f_s : frequência de desprendimento de vórtices; V : velocidade de escoamento do fluido; D : diâmetro da seção.

2.1.2 Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade é a medida de rigidez do material (ALMEIDA, 2012), determinado pela razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante, dentro do limite elástico, sendo a máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente. Este parâmetro é expresso por meio da Eq. 2:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

Onde: E : Módulo de elasticidade; σ : Tensão aplicada; ϵ : Deformação elástica longitudinal da seção.

2.1.3 Frequência natural

A incidência de pressões provenientes do vento sobre a torre dá origem a vibrações, que irão excitá-la e, por conseguinte, irão se propagar pelas demais seções do gerador eólico, resultando em possíveis falhas na estrutura. Além destas, pode-se citar a influência do conjunto que constitui a turbina, que, quando em atividade normal excitam a torre, assim como a rotação das pás também geram vibrações.

Estruturas maciças possuem uma frequência peculiar e costumam vibrar normalmente em torno do seu ponto de equilíbrio, provocando movimentos de oscilação. Essa propriedade singular é conhecida como frequência natural. Para Oliveira (2011), “quando ocorre uma vibração excessiva cuja frequência coincide com a frequência natural da estrutura, dá-se o fenômeno conhecido como Ressonância”. Conhecer esses fenômenos é de suma importância, pois garantirá a integridade estrutural das torres eólicas.

2.1.4 Teoria da energia de distorção (Von Mises)

A teoria da energia de distorção é um critério de falha estático e declara que um material dúctil cederá, quando a energia de deformação de distorção por unidade de volume atingir ou ultrapassar um valor crítico para esse material. Isso significa dizer que a tensão de Von Mises deve estar abaixo do limite de escoamento do material (aço), garantindo assim que este não está escoando.

2.1.5 Método dos Elementos Finitos (MEF)

A realização de uma análise por meio de elementos finitos fornece a determinação dos deslocamentos e esforços solicitantes. Nesta perspectiva, o MEF se fundamenta em um estudo contínuo, que pode ser descrito de modo pormenorizado, ou seja: as pequenas partes denominadas de elementos separam em várias divisões o domínio da estrutura,

e, segundo Vergara (2005), “estes elementos são interconectados em um número finito de pontos em cada elemento chamado de nós”. Assim, a utilização desse método em um experimento onde, a torre suposta engastada na base e livre na outra extremidade é discretizada em n elementos, onde cada elemento prismático contém as propriedades equivalentes à seção média do trecho longitudinal que modela a torre. Assumindo, conforme Vergara (2005), “uma solução geral das equações governantes para cada elemento do domínio”.

2.2. Recurso Computacional

A compreensão dos conhecimentos discutidos anteriormente é utilizada na concepção do projeto de análise da sensibilidade e desempenho da torre para geradores eólicos, nos quais a modelagem e a simulação são realizadas em software, utilizando a ferramenta comercial CAD-NX 9.0, visando a interpretação do comportamento funcional da torre proposta.

2.2.1 Software CAD-NX

As soluções NX para simulação incluem o NX CAE, um ambiente moderno que articula a melhor modelagem de análise com a simulação multidisciplinar e a gestão de dados integrada. Esse software possui a capacidade de proporcionar percepções com desempenho de alta qualidade em tempo hábil para a melhor tomada de decisão de produto, tudo baseado em um único ambiente. (SIEMENS PLM SOFTWARE, 2013).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental dividiu-se em duas fases distintas, sendo elas, a modelagem da torre proposta e a simulação dos carregamentos que incidem sobre a mesma.

3.1. Modelagem da Torre

Realizou-se a modelagem do elemento estrutural (Fig. 1.a) levando em consideração parâmetros primordiais, mencionados anteriormente. Quanto à geometria cilíndrica da seção, esta foi determinada por possuir um menor coeficiente de arrasto em contraponto a outras geometrias, proporcionando uma forma mais aerodinâmica, além de possuir um menor impacto visual. Determinou-se para esta um diâmetro externo de 115 mm, sendo composta por placas de aço com 5 mm de espessura. Em se tratando da dimensão longitudinal, a altura mínima considerada para os SWPG é de 9 m, porém, optou-se por um modelo com 18 m de altura no intuito de garantir uma melhor eficiência energética, visto que o vento atinge maiores velocidades.

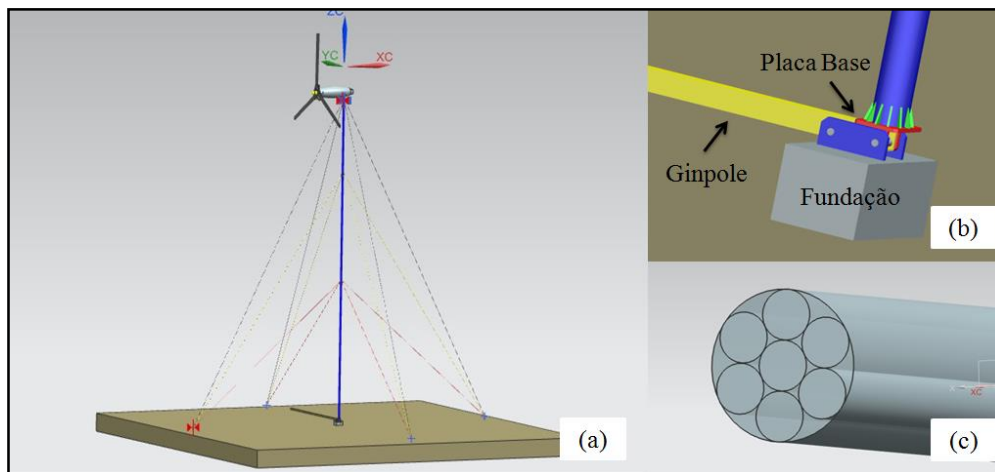


Figura 1. (a) Modelagem da torre proposta; (b) Cordoalha de sete fios (1+6); (c) Fundação estática e elementos complementares.

A fundação na qual a torre descansa foi considerada estática (Fig. 1.b), uma vez que esta hipótese fornece resultados aceitáveis e torna menos complexa a análise referida. Garantiu-se a estabilidade da torre por meio de quatro conjuntos de estais, contendo três cabos tensionados em cada. Estes foram ligados à torre em três níveis, seguindo a configuração de torre estaiada e ancorados em base de concreto, também considerada estática para a análise. O sistema de ancoragem deve tolerar, sem deformações consideráveis, o carregamento constante e cargas vibratórias dos cabos de sustentação em condições extremas, assegurando assim a vida útil da estrutura.

Modelou-se a torre utilizando o método de elementos finitos, sendo esta seccionada em três seguimentos, considerando cada um destes como elementos de viga. Para os estais, atribuiu-se a mesma configuração, possibilitando a abordagem aerodinâmica.

Quanto ao material, o recomendado para a torre é o aço de baixo carbono, ASTM A-36. Já para os estais, de acordo com o padrão TELEBRÁS (240-410-600), estes devem ser compostos por cordoalhas de sete fios com alma de alumínio, contendo um diâmetro máximo de 16 mm, do tipo HS (Alta Resistência) ou EHS (Extra Alta Resistência). Diante deste critério, para a modelagem dos estais desta pesquisa, foram utilizadas cordoalhas de aço de sete fios (1+6) com alma de alumínio (Fig. 1.c), entretanto, definiu-se um diâmetro equivalente referente a 14,13 mm, pois os cabos foram considerados como tubos maciços. Do mesmo modo, determinou-se o módulo de elasticidade equivalente dos estais em 187,5 GPa, considerando o aço ASTM A-36 (207 GPa para o aço e 73,1GPa para o alumínio).

3.2. Simulações dos carregamentos incidentes na torre

O processo de simulação do projeto foi composto por diversas etapas, como a atribuição e a formatação das propriedades do material escolhido para os elementos estruturais, considerados nesta análise (torre e cabos de sustentação), além da definição dos carregamentos, edição das restrições e criação das malhas. Apesar de haverem quatro conjuntos de estais, foram retirados dois destes ao realizar a simulação, isso porque eles não ofereciam nenhuma resistência à tração, não interferindo assim na análise.

O software utilizado é munido de malhas avançadas, assim, possibilitou-se a criação e configuração das mesmas de acordo com as adequações do modelo, combinando elementos 0D, 1D e 2D. Foi possível realizar o refinamento das malhas, proporcionando um controle para uma análise mais detalhada e eficiente. Em se tratando do tipo de elemento, a modelagem da seção longitudinal da torre caracterizou-se como elemento de viga. A mesma configuração foi aplicada aos conectores que interligam os estais à torre (Fig. 2.a), simplificando assim a análise desta ligação (Fig. 2.b).

Quanto à conexão, utilizou-se o tipo RBE2. Este molde trata-se de um elemento rígido, em que os nós selecionados são cineticamente acoplados de tal modo que eles não realizam deslocamentos relativos e rotações para o outro. As restrições de ancoragem para os cabos foram editadas fixando a translação e permitindo movimentos de rotação, conferindo assim certa mobilidade a estes elementos. Em se tratando destes em relação ao solo e estabelecendo uma ordem crescente no nível de disposição dos cabos de baixo para cima, os cabos do último nível (nível três) foram fixados à base. Os demais cabos (nível um e dois) foram acoplados aos do último nível, considerando impedimento para todos os graus de liberdade.

Em referência aos carregamentos, os elementos da turbina foram representados por uma carga pontual no topo da torre para simular a mesma. O valor dessa força axial equivale a 333,54 N, considerando o valor da aceleração da gravidade $9,81 \text{ m/s}^2$. Em um segundo caso de carregamento, foi considerada uma força que representa o empuxo da turbina devido à ação do vento, tendo valor equivalente a 890 N e sendo disposta no quadrante com um ângulo de 45° . Ambos os carregamentos foram aplicados no centro de massa do rotor.

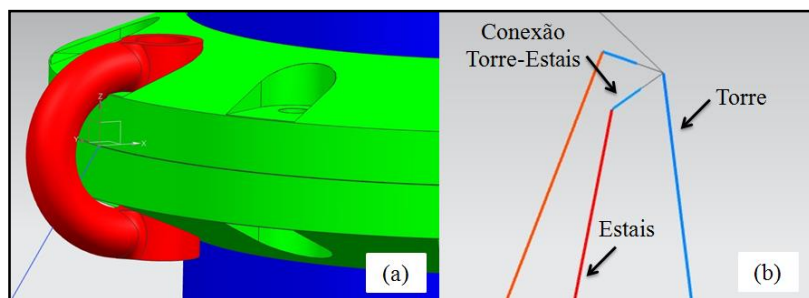


Figura 2. (a) Conexão torre-estais da torre proposta; (b) Conexão simplificada para simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente análise estrutural abrange o cálculo de respostas dinâmicas para o desempenho global da estrutura. A interpretação dos resultados fundamentou-se no contraste das soluções obtidas pelo embasamento teórico com dados obtidos a partir da observação experimental. Os valores padrões adotados para as propriedades mecânicas do aço na presente análise foram 250 MPa para a Tensão de Escoamento (F_y) e 207 GPa para o Módulo de Elasticidade.

4.1. Tensões de Von Mises

O software permite analisar a ocorrência das tensões na torre, a julgar pelas cargas permanentes (peso próprio da torre + peso da turbina) e pelo empuxo da turbina resultante da ação do vento, através de uma escala de cores que distingue a intensidade da tensão em cada ponto do elemento estrutural. A Figura 3 demonstra os valores das tensões de Von Mises atingidas por meio da execução da análise estática linear.

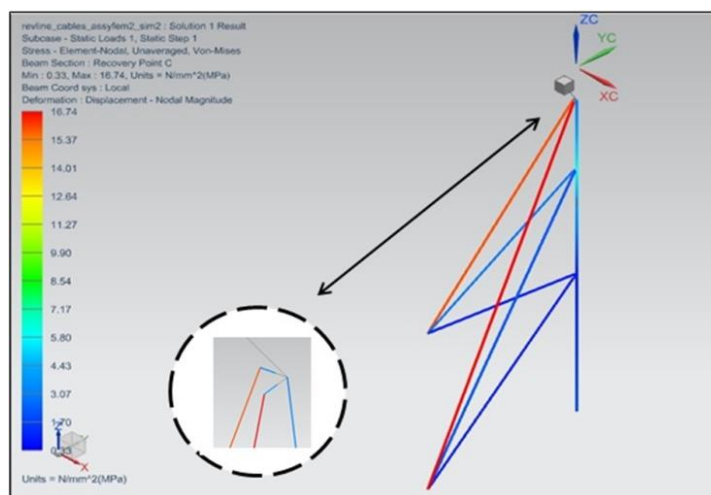


Figura 3. Tensões de Von Mises no modelo da torre analisada.

Constatou-se que a tensão máxima ocorre nos cabos do nível três (topo da torre), considerando a disposição de níveis retrocitada, sendo seu valor equivalente a 16,74 MPa, o que confere uma margem de segurança de 93,3% em relação ao limite de escoamento do aço, para a estrutura como um todo. Outro aspecto evidenciado, é que as tensões máximas encontram-se próximas ao local em que os carregamentos são aplicados. Assim, a tensão mínima, referente a 0,33 MPa, foi evidenciada na base da torre, bem como nos cabos do nível um.

Ao realizar uma análise das seções transversais dos conectores anexados aos cabos (elemento cuja função é conectar os estais à torre), em que ocorrem as tensões máximas, considerando duas seções distintas (elementos 69 e 135), foi possível identificar que as tensões na superfície externa destas seções são superiores à tensão máxima no elemento estrutural como um todo. Isso se dá porque a área do conector é muito pequena, comparando-se à área de toda a estrutura. A Figura 4 ilustra as seções transversais destes elementos.

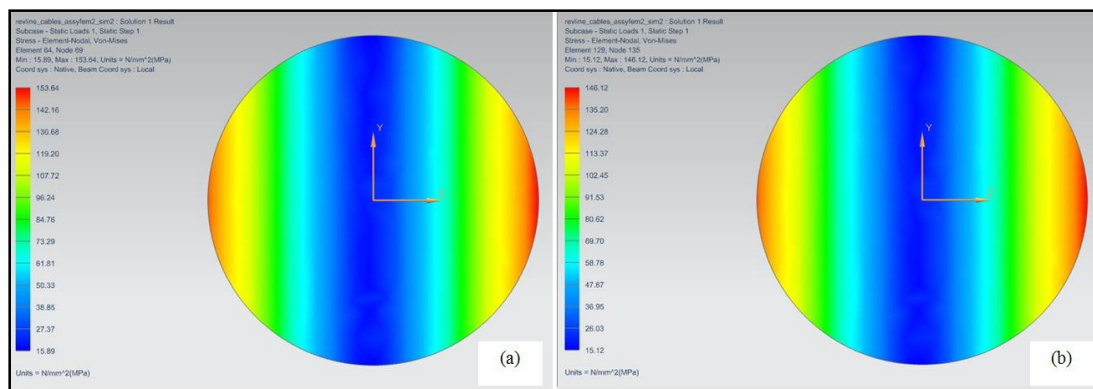


Figura 4. Tensões de Von Mises nas seções transversais dos elementos analisados (a) Elemento 69; (b) Elemento 135.

Por meio desta análise foi possível definir o tipo de solicitação que cada ponto da seção transversal do elemento está submetido. As tensões máximas detectadas nestas seções correspondem a 153,64 MPa e 146,12 MPa.

Diante dos resultados expostos anteriormente e relacionando as tensões máximas determinadas, averiguou-se que nenhuma destas excedem o valor da tensão de escoamento do aço, referente a 250 MPa. Ao analisar este parâmetro, identificou-se que o material não está escoando, ou seja, não está sofrendo deformação plástica, uma vez que ainda se encontra dentro do limite elástico.

4.2. Deslocamentos Horizontais

No que se refere ao deslocamento resultante, os valores mensurados estão dentro do limite estabelecido para os SWPG, visto que, em se tratando da análise de rigidez, o topo da torre não pode defletir mais que 15 cm. Ressalta-se ainda, que estes valores são mínimos, portanto não oferecendo qualquer dano à estrutura.

Tabela 1. Deslocamentos horizontais de Von Mises.

Deslocamentos horizontais	Valor em (cm)
Máx. ↓ Min.	1,445
	1,325
	1,204
	1,084
	0,963
	0,843
	0,723
	0,602
	0,482
	0,241
	0,120
	0,000

Como esperado *a priori*, os deslocamentos horizontais máximos encontram-se no topo da torre e como observado previamente na Tab. 1, o deslocamento máximo foi da ordem de 1,445 cm, o que confirma o não comprometimento da estrutura diante do critério apontado, apresentando ótimo desempenho.

4.3. Forças de Reação

Ao observar a magnitude das forças de reação no elemento estrutural avaliado, percebeu-se que a força de reação máxima se encontra na extremidade inferior da torre, ou seja, em sua base. Sobre as propriedades mecânicas do aço (ASTM A-36), as tensões normais (σ_{adm}) dispõem de três casos, sendo eles, o Caso Normal, Caso Ocasional e Caso Excepcional, com valores de tensões admissíveis, 190 MPa, 205 MPa e 230 MPa, respectivamente. Os esforços admissíveis desse material foram confrontados aos valores adquiridos na análise.

Sendo o Caso Normal o de menor tensão normal admissível, calculou-se para este, a força admissível do material (aço), já que a área da seção transversal da torre e a tensão admissível são parâmetros conhecidos. Assim, têm-se que a força admissível do aço é 329,3 kN. Neste caso, o valor máximo para esta força auferido pela simulação foi de 5,4 kN, isso demonstra que as forças de reação estão dentro do valor admitido.

4.4. Frequências Naturais

Na sequência, são apresentados os resultados pertinentes aos primeiros modos de vibração no tocante ao modelo estrutural, correspondentes às dez primeiras frequências naturais visto que estas são consideradas as mais significativas. Estas foram obtidas por meio de uma análise modal, para tanto, na avaliação vibracional deste modelo, admitiu-se que a velocidade de rotação do rotor é de 490 rpm, isso equivale a uma frequência de excitação do rotor de 8,16 Hz.

Ressalta-se que para garantir efeitos favoráveis, é requerido que todas as frequências naturais da torre não estejam próximas ao modo de excitação, pois isto reproduziria um fenômeno de sobreposição destas frequências, acarretando na majoração do deslocamento. Este fenômeno é conhecido como Ressonância. A Tabela 2 constata as frequências naturais adquiridas.

Tabela 2. Modos de vibração do modelo analisado.

Modos de Vibração	Frequências Naturais do modelo analisado (Hz)	Discrepância Percentual (%)
f_1	7,56	7,35
f_2	8,70	6,62
f_3	9,13	11,89
f_4	9,90	21,32
f_5	10,96	34,31
f_6	11,04	35,30
f_7	13,86	69,85
f_8	17,30	112,01
f_9	22,79	179,29
f_{10}	25,46	212,01

Verifica-se que, dos valores das frequências naturais dispostos pelo modelo da torre em estudo, os dois primeiros são muito próximos do correspondente à frequência de excitação do rotor, entretanto apresentam diferenças aceitáveis sob o

ponto de vista percentual, já os modos de vibração subsequentes são mais distantes. Pode-se afirmar que o modelo desenvolvido apresenta resultados coesos e confiáveis.

4.4.1. Análise baseada no modelo de Strouhal

Quando um fluido escoar através de um cilindro (neste caso, a torre), este provoca vibrações no corpo da mesma, sendo estas conhecidas como vibração induzida por escoamento do fluido. Considerando um $Re > 1000$ para cilindros, tem-se que a frequência adimensional de emissão de vórtices para uso prático em estruturas aerodinâmicas é aproximadamente 0,21.

Por meio do número de Strouhal, admitindo uma velocidade mínima de 1 m/s e uma frequência de emissão de vórtice de 1,83 Hz, temos um diâmetro referente a $D = 0,115$ m. Reutilizando a equação do número de Strouhal e dispondo a frequência em função da velocidade, obteve-se a frequência de geração de vórtices em função da velocidade, sendo $f = 1,83V$. A emissão de vórtices por um cilindro pode ser denominada de auto-excitação, considerando que nenhum componente do fluxo do fluido se altera. Assim, através desta correlação, determinaram-se as frequências de emissões de vórtices supondo velocidades de 0 a 20 m/s.

Considerando uma dada velocidade e sua frequência resultante, para determinar as forças de elevação (F) incidentes no elemento estrutural, as quais variam harmonicamente em função dos parâmetros retrocitados, considerou-se a equação seguinte:

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

Onde (RAO, 2008): c: É uma constante ($c \approx 1$ para cilindros); ρ : Densidade; V: Velocidade; A: Área projetada do cilindro perpendicular à direção de V; ω : Frequência circular ($\omega = 2\pi f$); t: Tempo.

Aplicando a fórmula retrocitada, temos que a força variando no tempo é uma função senoidal, caracterizada pela sua frequência circular. Vale ressaltar que a velocidade mínima para que uma turbina eólica entre em atividade é de 3,0 m/s e que velocidades superiores a 13 m/s já são consideradas elevadas. Desta forma, avaliou-se os extremos desta variável. Os valores estipulados são expressos na Tab. 3.

Tabela 3. Dados da análise através do número de Strouhal para os dez primeiros modos de frequências naturais averiguados.

V (m/s)	f (Hz)	ω (rad/s)	F (N)
4,1	7,56	47,50	21,38
4,8	8,69	54,60	28,24
5,0	9,13	57,37	31,18
5,4	9,9	62,20	36,66
6,0	10,9	68,49	44,44
6,0	11,0	69,12	45,26
7,6	13,9	87,34	72,26
9,5	17,3	108,70	111,94
12,5	22,8	143,26	194,43
14,0	25,5	160,22	243,20

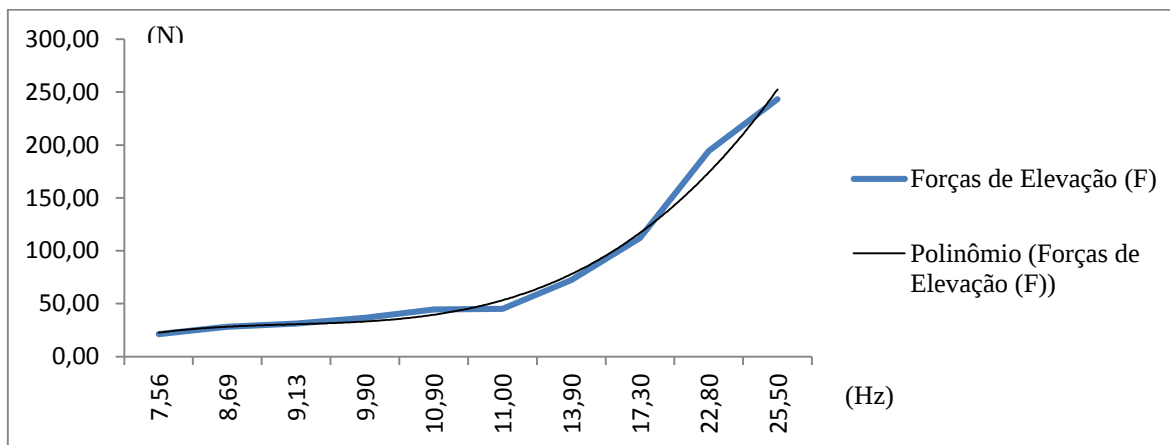
Para o projeto estrutural, deve-se garantir que a magnitude da força que incide sobre a torre seja menor do que a carga de falha estática. Constatou-se anteriormente, que o material possui a capacidade de suportar as cargas aplicadas no modelo, uma vez que este critério associa-se ao escoamento do material. Entretanto, para reduzir o nível de vibrações e suavizar possíveis problemas de ressonância, pelo efeito de vibrações induzidas através do escoamento do fluido, orienta-se que se integrem à estrutura da torre, amortecedores de vibração. Estes amortecedores dissipam a energia decorrente do carregamento do vento, fazendo com que as forças de elevação sejam contrabalanceadas parcialmente, atenuando o movimento da torre e gerando oscilações amortecidas.

O amortecimento de uma estrutura é resultante de diferentes causas. Neste estudo, fez-se uso de um amortecimento físico por intermédio dos cabos de sustentação, visto que estes conferem uma maior rigidez ao elemento estrutural, contribuindo para dissipação da energia proveniente da geração de vórtices. Em consequência desta contribuição, as forças de elevação (F) apresentam valores reduzidos, como se observa na Tab. 3.

Dentre os métodos utilizados para minimizar falhas causadas por vibração induzida pelo fluxo do escoamento, vale mencionar um modelo de amortecedor difundido na literatura (Stockbridge).

Os amortecedores de vibração são integrados por meio dos cabos de sustentação entre o topo da estrutura e o solo. Deste modo, indica-se a implementação de amortecedores nos cabos de sustentação, conferindo assim uma melhor estabilidade a torre, além de ser uma forma preventiva para possíveis fenômenos, como a ressonância, por exemplo.

Mediante os resultados alcançados na Tab. 3, elaborou-se um gráfico que melhor representa o comportamento da curva frequência-força, facultando um novo tratamento dos dados.

Gráfico 1. Frequência de geração de vórtices e forças de elevação (F) resultantes.

O Gráfico 1 expressa a curva das forças resultantes (eixo das ordenadas) concebidas pelas frequências de geração de vórtices (eixo das abscissas), sendo estas, referentes aos dez primeiros modos vibracionais. Tal curva é dada por um polinômio de terceiro grau, de acordo com a linha de tendência. Este é expresso pela seguinte equação:

$$y = 0,5924x^3 - 5,2139x^2 + 17,16x + 10,042 \quad (4)$$

Dada uma velocidade de escoamento qualquer e sua respectiva frequência de geração de vórtices, é possível determinar através da Eq. (4), a força de elevação que tal frequência provocará. Diante desta possibilidade, tendo o conhecimento das forças máximas que irão incidir sobre a torre, é factível a realização de duas análises futuras para este projeto estrutural: analisar que estaticamente o modelo assegure o não rompimento da torre e que dinamicamente a força de elevação não será auto-excitada.

5. CONCLUSÃO

Esta estrutura foi desenvolvida para possível fabricação, assim como, ser utilizada em referência de pesquisas relacionadas às respostas dinâmicas da torre aos carregamentos constantes e variáveis. Fundamentado nos resultados das simulações e confrontando-os com a literatura existente, as seguintes conclusões foram feitas:

- Tensões de Von Mises:** As condições de integridade da torre foram averiguadas com conforto. Considerando-se o limite de escoamento do aço (ASTM A-36) a 250 MPa, dispõe-se de uma margem de segurança de 38,5% para o maior valor de tensão.
- Deslocamentos Horizontais:** Por meio da análise pôde-se detectar uma margem de segurança de 90,4%, considerando o valor permitido para a deflexão no topo da torre, referente a 15 cm.
- Forças de Reação:** Obtiveram-se resultados satisfatórios, de acordo com os critérios necessários para o bom funcionamento do modelo averiguado.
- Análise Vibracional:** Esta análise proporcionou uma melhor previsão do comportamento estrutural da torre, mediante os carregamentos críticos impostos a mesma. Através do número de Strouhal, foi possível desenvolver a curva que melhor define a relação frequência-força e dispor de uma equação polinomial que garante uma avaliação prévia em função da velocidade.
- Cabos de Sustentação (Estais):** Constatou-se o reforço que os cabos de sustentação proporcionaram ao objeto analisado, minorando os possíveis modos de flexão que a estrutura pode sofrer. Deste modo, afirma-se que os estais conferem uma melhor estabilidade e segurança à estrutura como um todo.

Tais resultados asseguram que o modelo projetado nesta pesquisa atende a todos os requisitos mencionados, pois se conseguiu aumentar a resistência da estrutura, levando em conta os parâmetros teóricos que serviram de base nesta análise. A implementação dos conjuntos de cabos de sustentação eleva os custos do projeto da torre, em contraponto, podemos considerar uma economia futura, evitando assim manutenções desnecessárias ou contínua troca de peças, garantindo um maior tempo de vida útil da estrutura.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Sílvia Martins de. Análise do Módulo de Elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. 2012. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

- AMARAL, Lucas. Modelagem e simulação de estrutura de torre para suporte de turbina eólica sob ação do vento. 2013. 75 f. TCC – Requisito para disciplina: Trabalho de Graduação III, Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2013.
- MATHEW, Sathyajith. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Heidelberg: Springer-verlag, 2006. 246 p.
- OLIVEIRA, Luciana de Sousa de. Regras e boas práticas para instalação de torres anemométricas voltadas para estudo de potencial eólico. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- PINHEIRO, Marco Antonio Silva. Vibrações aeroelásticas em torres esbeltas. 2004. 160 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- RAO, Singiresu S. Vibrações mecânicas / Singiresu S. Rao; revisor técnico José Juliano de Lima Júnior; tradução Arlete Simille. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- RIVERA, José Santiago Toro. Aerodinâmica do sistema torre – turbina eólica de eixo horizontal. 2013. 130f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciências em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- SANT'ANNA, Emilio. Leilão em dezembro busca impulsionar geração de energia por ventos no Brasil: Projetos concorrem uma semana após início da Conferência do Clima. Infográfico do G1 explica como funciona um gerador de energia eólica.. 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1367045-5603,00-leilao+em+dezembro+busca+impulsionar+geracao+de+energia+por+ventos+no+brasil.html>>. Acesso em: 13 jun. 2014.
- SIEMENS PLM SOFTWARE. Siemens PLM. Disponível em: <http://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/>. Acesso em: 06 jan. 2015.
- SISTEMAS DE DOCUMENTAÇÃO TELBRÁS. TELEBRÁS 2140-410-600 – Procedimentos de Projetos para Torres Metálicas Auto-Suportadas, Estaiadas e Postes Metálicos: Série Engenharia. 1997. 46f.
- VERGARA, Ricardo Freitas. Análise estrutural de torres anemométrica e de sustentação de turbinas eólicas. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade do Rio Grande, Rio Grande, 2005.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DESIGN AND ANALYSIS BASED ON FINITE ELEMENT METHOD OF A STAYED TOWER USED TO SUPPORT SMALL WIND POWER GENERATORS

Fernanda Gondim de Almeida¹, fernandagondimalmeida@gmail.com

Alex Sandro de Araújo Silva¹, alex.araujo@ufersa.edu.br

Márcio Furukava¹, furukava@ufersa.edu.br

Ítala Magila Martins Alves¹, italamagila@gmail.com

¹ Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas – Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.

Abstract. Home users increasingly use Small Wind Power Generation-SWPG for energy supplying. However, these systems need to be installed on towers at least 9 m to achieve satisfactory performance. The companies that provide this equipment class do not offer on the package the tower due to logistical issues and leave this component under the responsibility of users. Thus, the correct design and analysis of a tower to SWPG should be made on the actual characteristics of existing loading, not just Linear Static condition, but wind loading and self-excitation of all system. The aim of this paper is present a Finite Element Analysis carried out in the Design of a small wind power generator. In this case, analyzing critical loads that acts into tower and interpreting functional behavior of the tower through Finite Element Method (FEM), at the prospect that the dynamic characteristics of the tower are critical to its structural performance. The first step was the modeling of the tower for Bergey Excel 1 Wind Power Generator using CAD commercial software NX 9.0, followed by modeling a FEM model of the tower, after that running the simulation cases, held in the same computing environment. Finally, the data analysis has been performed. Through accrued results, it was found that the project plays a good structural behavior, considering that the parameter of maximum stresses of the tower and you are is within the yielding limit. The other attributes, such as maximum displacement, vibrational reaction force and analysis of the tower had significant safety margins. The reviewed model has met resistance criteria and stability of the structure within what is permissible, ensuring safety and efficiency to the project, highlighting that the cable stays were essential in this proposed design.

Keywords: *FEM, NX 9.0 Advanced Simulation, Stayed Tower, Wind Power Generator.*