



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UnICEUB
FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - FATECS**

PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

CARLOS EDUARDO COSTA DE FARIA

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM UMA TORRE DE ENERGIA EÓLICA

**BRASÍLIA
2018**



CARLOS EDUARDO COSTA DE FARIA

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM UMA TORRE DE ENERGIA EÓLICA

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica
apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e
Pesquisa pela Faculdade de Tecnologia e Ciências
Sociais aplicadas - FATECS

Orientação: Prof. Dr. Marcos Rafael Guassi

BRASÍLIA
2018

Dedicatória

Dedico esse trabalho a minha família, sem vocês nada disso seria possível.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu Prof. Dr. Marcos Rafael, por me acompanhar ao longo dessa pesquisa, agradeço a paciência, dedicação e os seus sábios ensinamentos. Aos meus amigos e colegas, que me deram suporte nessa jornada.

Agradeço ao UniCEUB pelo ambiente agradável, por todos recursos disponibilizados e que viabilizaram essa pesquisa e pela prestatividade de todos.

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM UMA TORRE DE ENERGIA EÓLICA

Carlos Eduardo Costa de Faria - UniCEUB, PIC Institucional, aluno bolsista
eduardo.meia4@sempreceub.com

Marcos Rafael Guassi - UniCEUB, professor orientador
marcos.guassi@ceub.edu.br

Um dos grandes problemas da atualidade é a questão energética. A energia eólica tem se destacado bastante por ser uma alternativa sustentável a médio e longo prazo, e por se tratar de uma fonte de energia renovável, limpa e inesgotável.

As torres que sustentam o aerogerador são flexíveis, esbeltas e expostas a vibrações excessivas, provenientes da interação entre o vento e a estrutura. Essas forças podem induzir vibrações, que caso se aproximarem da frequência natural da estrutura, aumentam sua amplitude de oscilação, acarretando em danos à mesma, diminuindo seu tempo de vida útil e colocando-a risco. Visando amenizar essas vibrações geradas por forças externas, emprega-se amplamente um dispositivo de controle, o amortecedor de massa sintonizada (AMS). Esse dispositivo consiste essencialmente de um sistema massa-mola-amortecedor, conectado a estrutura da torre e sintonizado na sua frequência natural, com o objetivo de evitar a ressonância.

O modelo da torre proposto neste trabalho foi modelado no software ANSYS R19.0, como um elemento de viga vertical e com a utilização de um elemento de massa concentrada no topo da torre para representar a nacela do aerogerador. Adotou-se um carregamento harmônico, simulando o efeito do vento, de maneira simplificada, aplicado no topo da estrutura. Junto ao nacela se localiza o AMS.

Foram realizadas as análises estática, modal e transiente, além de verificar-se a eficiência do AMS. Os resultados obtidos reforçam o âmbito do controle de vibrações através do controle passivo das vibrações estruturais.

Palavras-Chave: *Dinâmica das estruturas, vibrações, amortecedor de massa sintonizada, torre eólica, controle estrutural*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Amortecedor de massa sintonizada	2
1.2	Objetivos	5
2	Fundamentação teórica	6
3	Metodologia	8
3.1	Modelagem física e geométrica	8
3.2	Software ANSYS	8
3.3	Modelagem computacional	9
3.4	Análise modal	9
3.5	Análise transiente	9
3.6	Parâmetros ótimos do AMS	9
4	Resultados e discussões	11
4.1	Análise Modal	11
4.2	Cálculo dos parâmetros ótimos do amortecedor de massa sintonizada .	13
4.3	Análise transiente	14
	Referências Bibliográficas	17

Capítulo 1

Introdução

Devido ao aumento da demanda energética e com a crescente preocupação com a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera, o mundo tem buscado cada vez mais o desenvolvimento de fontes de geração de energia limpa. Destaca-se dentre elas, a eólica.

A exploração da energia do vento revela-se uma fonte de energia promissora, mas essa não é uma ideia recente, o registro de moinhos de vento para bombeamento de água e moagem de cereais, data de mais de 3000 anos [1].

Na Europa, a utilização e o desenvolvimento dos moinhos de ventos aumentou continuamente entre os séculos XII e XIV. No final do século XIV um moinho típico europeu possuía um rotor de 25 metros de diâmetro e altura de aproximadamente 30 metros [2].

Um turbina eólica ou aerogerador, é um equipamento que capta a energia cinética do vento, convertendo-a em energia elétrica. São classificados pelo modo como as pás interagem com o vento ou pela disposição do eixo da turbina.

Atualmente os modelos de aerogeradores que mais são empregados são: o de eixo vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine) e o de eixo horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine), visto na figura 1.1. Sendo o mais usual o uso são dos aerogeradores de eixo horizontal (HAWT), por apresentarem um maior proveito da energia do vento.

Os principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal:

- Anemômetro: afere a direção, a intensidade e a velocidade do vento;
- Catavento: mede a direção do vento, é responsável por transmitir ao sistema de controle a posição instantânea do vento, permitindo ao aerogerador manter-se orientado ao vento de forma a otimizar a energia cinética do vento, aumentando a potência produzida;
- Gearbox (caixa multiplicadora): tem a função de transformar as rotações que as pás transmitem ao eixo de baixa velocidade, entregando ao eixo de alta velocidade as rotações que o gerador precisa para funcionar;
- Gerador: converte a energia mecânica em energia elétrica;
- Nacele: compartimento situado no topo da torre constituída por: chassis, caixa multiplicadora (Gearbox), sistema de controle eletrônico, sistema hidráulico e sistema yaw;



Figura 1.1: Torre eólica com aerogerador de eixo horizontal do tipo HAWT. FONTE: <https://fabricioengmec.blogspot.com/2017/07/historia-da-energia-eolica-e-suas.html>

- Pás: São produzidas a partir de materiais como a fibra de vidro e o plástico. Visam captar o vento e direcionar sua potência ao centro do rotor;
- Rotor: elemento de fixação das pás que transmite o movimento de rotação para o eixo de movimento lento. Um de seus principais componentes é o sistema hidráulico que permite o movimento das pás em distintas posições para otimizar a força do vento ou parar a turbina por completo;
- Torre: elemento que sustenta a nacelle e o rotor

As turbinas eólicas com rotor de eixo vertical são normalmente mais caras e apresentam desempenho inferior que os de eixo horizontal, em razão do gerador não girar segundo a direção do vento, apenas o rotor se movimenta enquanto o gerador fica parado. São exemplos de rotores de eixo vertical os rotores do tipo Savonius, da figura 1.2 e os rotores do tipo Darrieus, da figura 1.3.

De acordo com Dellezopolles [3](2011), as torres podem ser das seguintes formas: tubular cilíndrica, cônica ou treliçada, como a mostrada na figura 1.4 - utilizando concreto ou aço na composição de sua estrutura.

As torres tubulares, como a da figura 1.1, correspondem ao modelo de estrutura mais empregado na construção de turbinas eólicas [1, 2, 3, 4]. Isso deve-se ao fato de apresentarem melhor eficácia em relação a sua rigidez, pois possuem pontos discretos de ligação entre os módulos que favorecem a sua montagem a grandes alturas, e conseqüentemente, a segurança dos montadores.

1.1 Amortecedor de massa sintonizada

Torre eólicas são estruturas altas, esbeltas e encontram-se constantemente submetidas a esforços de vento - estes induzem vibrações na estrutura. Essas solicitações podem causar à estrutura efeitos superiores aos calculados daqueles previstos na análise de modelo estático. Logo, é necessária a realização de uma análise dinâmica,



Figura 1.2: Torre eólica com aerogerador de eixo vertical do tipo Savonius. FONTE: <https://pixabay.com/pt/rotor-savonius-vertical-3084781/>



Figura 1.3: Torre eólica com aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus. FONTE: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55?picture=LPQ8tvaHYVd>



Figura 1.4: Torre eólica com aerogerador de eixo horizontal com torre treliçada.
FONTE: <http://www.brametal.com.br/produto/3/>

que leve em consideração a variação temporal desses efeitos. A realização desse tipo de análise possibilita determinar os valores de deslocamentos, tensões e acelerações da estrutura, que não são detectados em uma análise estritamente estática.

Casos como o de “Tacoma Narrows Bridge” - que em virtude do efeito do vento, entrou em ressonância e ruiu, em 1940 - fomentaram inúmeros estudos na área de dinâmica das estruturas nas últimas décadas.

Segundo Valência [5], um dos dispositivos mais adotados por engenheiros civis para se combater esse tipo de dano é o amortecedor de massa sintonizada (AMS). Ele consiste em um sistema massa, mola e amortecedor fixado a um sistema livre para vibrar, visando reduzir a resposta dinâmica da estrutura. Vigas, torres, passarelas de pedestres, pontes e edifícios altos são estruturas que vêm se beneficiando com a aplicação do AMS para aprimorar a sua performance.

A frequência do amortecedor é sintonizada para uma frequência particular da estrutura, pois, uma vez que a estrutura for excitada, o amortecedor irá vibrar fora de fase com o movimento da estrutura. Esse método de controle estrutural tem como principal finalidade de diminuir a amplitude do pico de ressonância [6](Alves, 2015).

Chen e Huang [7] estabelecem que para o AMS ter uma boa aplicabilidade, a razão μ entre a massa do amortecedor e a massa total - deve estar entre 5% e 15%. No presente trabalho adotou-se os valor de 10%. Com esses valores estabelecidos calculou-se os parâmetros ótimos.

Den Hartog [8] deduziu os parâmetros ótimos para uma boa aplicabilidade dos amortecedores de massa sintonizada, estas deduções assumem que o sistema principal tenha fator de amortecimento nulo, ou seja, apenas o sistema de amortecimento seria o responsável pelo controle de vibrações da estrutura. A sua técnica de otimização foi desenvolvida com o objetivo de minimizar o deslocamento da estrutura, sob ação de um carregamento harmônico.

Este trabalho visa compreender a eficácia do conjunto estrutura-amortecedor, os

parâmetros de amortecimento necessários para se obter melhor controle dos deslocamentos devido às cargas dinâmicas, dessa forma, podendo-se determinar os parâmetros ideais de um projeto.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar os deslocamentos de uma torre eólica, com e sem a presença de um amortecedor de massa sintonizada, verificando assim numericamente a eficácia do dispositivo de controle estrutural neste tipo de estrutura. Para alcançar esse objetivo, serão realizadas etapas intermediárias, com o intuito de apresentar um modelo capaz de simular o comportamento de uma torre eólica; analisar deformações da estrutura através da modelagem no pacote de elementos finitos do ANSYS; e comparar os deslocamentos com e sem a presença do AMS, adotando diferentes valores para a frequência da excitação externa.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

Beneveli [9] estudou o uso do controle estrutural na proteção de estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos buscando evitar níveis de vibração que possam gerar desconforto, comprometer a segurança e integridade da edificação. Adotou como controle estrutural o amortecedor de massa, entre eles o AMS. Concluindo que em mecanismos de controle passivo, o AMS tem uma grande influência na resposta do sistema e que em muitos casos houve redução da amplitude de oscilação.

Valência [5] investigou o controle de oscilações em vigas metálicas com distintas condições de vínculos empregando amortecedores de massa sintonizada. Utilizou quatro modelos de viga: biapoiada, engastada e apoiada, simplesmente apoiada com dois balanços e uma viga Gerber com balanços. Submeteu estas estruturas sob dois tipos de carregamento: harmônico e aleatório, almejando definir numericamente a eficácia de um sistema de controle passivo (AMS e AMSM) na redução de vibrações excessivas e no controle da reação dinâmica da estrutura. Obteve os resultados numéricos com o auxílio do software ANSYS e inferiu que o emprego do controle estrutural reduz significativamente os deslocamentos.

Sirqueira [10], elaborou um modelo de elementos finitos no software ANSYS simulando o comportamento da torre eólica submetida ao carregamento promovido pelo vento nas pás da hélice. Determinou as frequências naturais, os modos de vibração bem como uma análise harmônica e transiente para investigar a reação dinâmica da estrutura no domínio do tempo. Concluiu que a realização de uma análise exclusivamente estática pode ocasionar no mau dimensionamento da torre e, conseqüentemente, em prováveis acidentes. Desta forma, constatou a relevância do estudo da parcela dinâmica.

Ávila e Pereira [11], utilizaram o amortecedor de massa sintonizada (AMS) sintonizado na frequência natural da estrutura de uma torre eólica buscando reduzir vibrações. Modelaram a estrutura como um elemento de barra com uma massa concentrada no topo da torre simulando a nacelle. Utilizaram o pacote de elementos finitos ANSYS para fazer as análises modal e transiente. Utilizaram de um carregamento harmônico, comparando os deslocamentos com e sem do amortecedor de massa sintonizada. Comprovaram a eficiência do uso de controle estrutural neste tipo de estrutura.

Dellezopolles Junior [3] fez uma análise dinâmica de torres de energia eólica. Essas torres servem de suporte para aerogeradores, os quais geram carregamentos dinâmicos na estrutura. Concluiu que a análise dinâmica é essencial para se obter resultados confiáveis a respeito do comportamento da estrutura.

Oliveira [1], buscou analisar o comportamento dinâmico de uma torre de gera-

dor eólico, visando obter um modelo numérico que simulasse melhor o modelo real. Utilizou-se do modelo de elementos finitos para realizar as análises modal e estudar as respostas dinâmicas da estrutura. Comparou os resultados experimentais e numéricos, concluindo que modelo de casca com sapata, ajustado aos resultados do ensaio, é a melhor representação da estrutura real, obtendo valores de frequências próprias próximos aos alcançados no ensaio dinâmico.

Alves [6], pesquisou sobre o controle de vibrações em um edifício de 36 pavimentos aplicando amortecedores de massa sintonizados (AMS) submetidos a cargas dinâmicas (vento ou terremoto). O vento foi descrito como um carregamento harmônico bem como utilizando o método do vento sintético. No seu trabalho os edifícios são modelados como sistemas do tipo shear-building de n graus de liberdade e, utiliza um amortecedor do tipo AMS – como controle estrutural - e sistema de isolamento de base. Concluiu que ao se alterar os parâmetros do AMS ótimo e o edifício é sujeito a um carregamento harmônico, a redução das amplitudes de oscilação são menores que as amplitudes com o AMS ótimo evidenciando a sua eficácia

Pereira [2], propôs um modelo de torre que foi modelado com elemento de viga sem as pás do rotor e a utilização de um elemento de massa concentrada no topo da torre atuando como a nacele do aerogerador. Desempenhou análises estruturais estática, modal e transiente, assim como sistemas de otimização em cada um desses regimes. Como dispositivo de controle estrutural utilizou-se um pêndulo, fixado a estrutura da torre e sintonizado em uma frequência de interesse, ambicionando fazer o dispositivo vibrar fora de fase com o movimento gerado pela interação vento-estrutura, e assim transmitir a energia vibratória para o próprio pêndulo.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Modelagem física e geométrica

A torre apresenta uma estrutura tubular cilíndrica, em aço, com espessura constante em toda a estrutura. As propriedades da torre podem ser verificadas na tabela 3.1:

Propriedades da torre	Valor
Altura (m)	80
Diâmetro da torre (m)	4
Espessura (m)	0,02
Massa do topo da torre (kg)	19876
Massa específica (kg/m ³)	7850
Módulo de Elasticidade (N/m ²)	$2,1 \cdot 10^{11}$

Tabela 3.1: Propriedades da torre modelada

3.2 Software ANSYS

A elaboração de uma modelagem estrutural, via elementos finitos ANSYS, geralmente é composta por três etapas:

- I. Pré-processamento: Fase na qual modela-se toda a estrutura, especificando os tipos de elemento, propriedades físicas e geométricas do material. A determinação do tipo de análise, a discretização da estrutura e a criação da malha, acontecem nessa etapa.
- II. Processamento: Nesta parte especificam-se as condições de contorno, o carregamento e sua aplicação na estrutura investigada.
- III. Pós-processamento: Compreende na obtenção das soluções. Tensões, aceleração da estrutura, deslocamentos nodais, deformações e frequências naturais, são exemplos que o software, proporciona, analisar.

3.3 Modelagem computacional

A torre foi modelada, como um elemento de viga com uma massa concentrada no topo para simular a nacela, no pacote de elementos finitos ANSYS.

Almejou-se, ao modelar a estrutura, empregar elementos que apresentassem mais apropriadamente o comportamento da torre e suas condições de apoio.

Utilizou-se dos elementos: BEAM4 e BEAM188, para simular a estrutura da torre; MASS21, para simular a nacela.

A estrutura foi discretizada em 401 nós e 400 elementos finitos, cada elemento tem 20 centímetros de comprimento.

3.4 Análise modal

O ANSYS R19.0 proporciona os métodos Block Lanczos, Damped, PCG Lanczos, QR Damped, Supernode, Subspace e Unsymmetric como mecanismos de extração dos modos de vibração da estrutura. Utilizou-se do Block Lanczos em virtude da rápida convergência de soluções obtidas.

A partir das frequências naturais ou modos de vibração da estrutura encontradas, modelou-se as propriedades do AMS e o carregamento harmônico.

3.5 Análise transiente

Os modos “Full” e o “Mode superposition” são os métodos disponibilizados pelo ANSYS R19.0 para desempenhar a análise transiente. Utilizou-se do método “Full” devido a sua simples aplicação em comparação ao outro modo.

Na análise transiente, é definida a reação dinâmica da estrutura por efeito de carregamentos harmônicos. Considerou-se uma carga senoidal

$$F(t) = P \text{sen}(\omega t + \phi), \quad (3.1)$$

com $P = 1000KN$ e o ângulo de fase ϕ sendo nulo, variando ao longo do tempo a fim de simular o esforço gerado pelo vento atuando na estrutura. A excitação dinâmica, aplicada na massa concentrada no topo da torre, é constituída por um harmônico ressonante. A frequência de excitação foi calculada igual à frequência natural da torre.

Por meio do método de Newmark, obteve-se a solução das equações de movimento da estrutura proposta. Esse método foi utilizado em virtude do pacote ANSYS utilizado na modelagem e solução dos problemas propostos utilizar-se desse método de integração direta e implícita.

3.6 Parâmetros ótimos do AMS

Através da razão μ entre a massa do amortecedor e a massa total, adotou-se o valores de 10%. Com este valor definido, calculou-se os parâmetros ótimos do amortecedor.

Den Hartog (1956) [8] definiu os parâmetros ótimos de amortecimento, estes são dados pelas relações:

$$\alpha_o = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3.2)$$

$$\epsilon_o = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (3.3)$$

$$\omega_a = \alpha_o \omega \quad (3.4)$$

Utilizou-se do Fortran 95 para o cálculo das constantes de rigidez e dos parâmetros ótimos de amortecimento do AMS.

O amortecedor de massa sintonizada (AMS) foi modelado utilizando-se dos elementos COMBIN14 e MASS21, para simular as massas, as molas e os amortecedores do dispositivo de controle.

Capítulo 4

Resultados e discussões

Com base na tabela 3.1, calculou-se as seguintes propriedades da torre eólica: momento de inércia I em torno do eixo z :

$$I_{zz} = \pi \frac{D^4 - d^4}{64} = 0,494143m^4, \quad (4.1)$$

sendo D o diâmetro externo e d o diâmetro interno da torre. A área da seção transversal:

$$A_s = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = 0,249876m^2 \quad (4.2)$$

O volume da torre:

$$V_{torre} = A_s H = 19,99008m^3 \quad (4.3)$$

A massa da torre:

$$M_{torre} = \rho_{aco} V_{torre} = 156.922,128kg \quad (4.4)$$

A massa total da estrutura:

$$M_{total} = M_{torre} + M_{topo} = 19.876kg \quad (4.5)$$

Definidos esses parâmetros, modelou-se a torre no pacote de elementos finitos ANSYS R19.0.

4.1 Análise Modal

Por meio do bloco Lanczos, presente no pacote de elementos finitos ANSYS, realizou-se análise modal. Assim, o programa determinou as frequências naturais e os modos de vibração da torre eólica.

Esses parâmetros correspondem aos modos de vibração mostrados nas figuras abaixo, do primeiro ao oitavo modo.

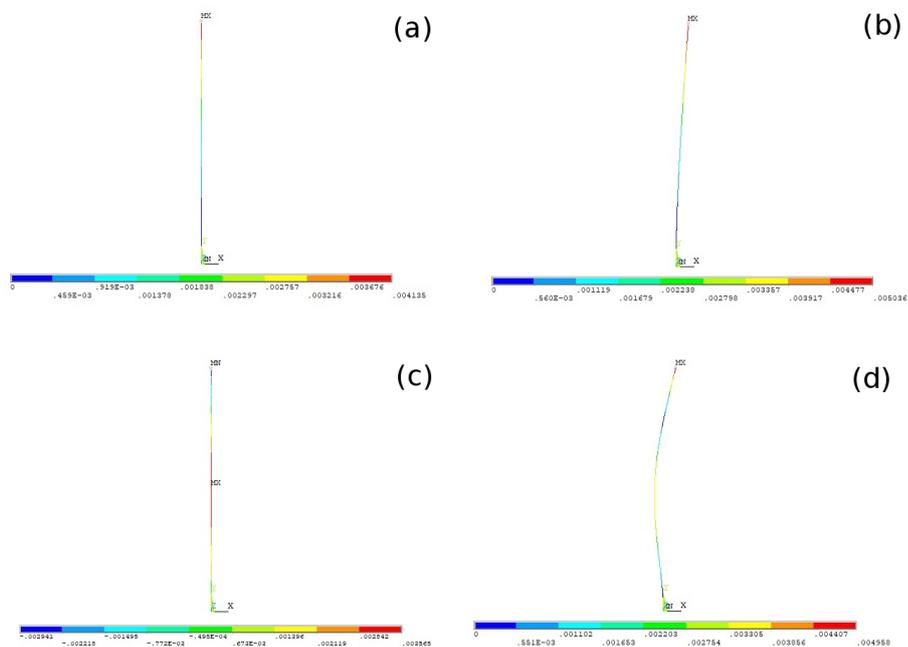


Figura 4.1: Modos de vibração da torre eólica com as frequências (a) 1^o modo, $f=0,51533\text{Hz}$, (b) 2^o modo, $f=0,63315\text{Hz}$, (c) 3^o modo, $f=3,3429\text{Hz}$, (d) 4^o modo, $f=3,8674\text{Hz}$.

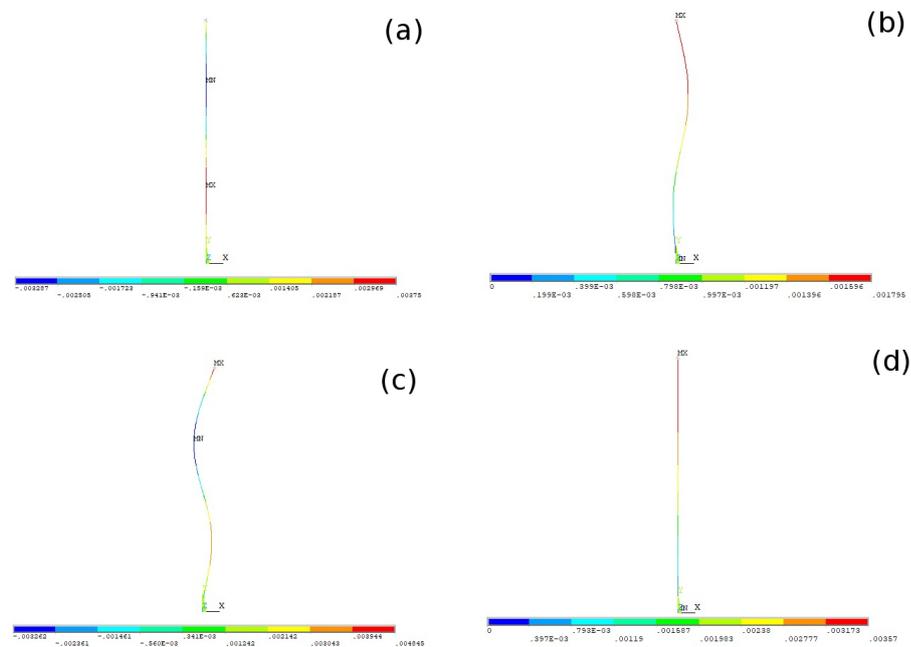


Figura 4.2: Modos de vibração da torre eólica com as frequências (a) 5^o modo, $f=9,3219\text{Hz}$, (b) 6^o modo, $f=10,024\text{Hz}$, (c) 7^o modo, $f=10,422\text{Hz}$, (d) 8^o modo, $f=16,163\text{Hz}$.

	BEAM188
1	0,51533
2	0,63315
3	3,34290
4	3,86740
5	9,3219
6	10,024
7	10,422
8	16,163

Tabela 4.1: Frequências naturais da torre eólica, em Hz.

4.2 Cálculo dos parâmetros ótimos do amortecedor de massa sintonizada

Utilizando-se dos valores obtidos na análise modal, os parâmetros ótimos definidos por Den Hartog [8] e por meio das seguintes manipulações mostradas abaixo, obteve-se as equações para determinar a rigidez e o amortecimento do amortecedor de massa sintonizada:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{K_a}{M_a}}. \quad (4.6)$$

Substituindo a equação 3.2 na equação 4.6, obtém-se a expressão

$$\frac{1}{1 + \mu} \omega = \sqrt{\frac{K_a}{M_a}} \quad (4.7)$$

Manipulando-se essa equação, chega-se a

$$K_a = \left[\left(\frac{1}{1 + \mu} \right) \omega \right]^2. \quad (4.8)$$

Sabe-se que

$$C_a = 2\epsilon_o M_a \omega_a. \quad (4.9)$$

Com a substituição das equações 3.3 e 4.6, obtém-se a expressão

$$C_a = 2 \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} (\mu M_{tot}) \sqrt{\frac{K_a}{M_a}} \quad (4.10)$$

Utilizando μ como 10%, nas equações 3.2, 3.3, determinam-se os valores

$$\alpha_{otimo} = 0,9090909090909090 \quad (4.11)$$

$$\epsilon_{otimo} = 0,16785203315363553 \quad (4.12)$$

$$M_a = 17.679,8128kg \quad (4.13)$$

Inserindo esses valores nas equações 3.4, 4.10 chega-se a

$$\omega_a = 2,943558077rad/s \quad (4.14)$$

$$K_a = 154.134,64435562171N/m \quad (4.15)$$

Com todos esses valores, calcula-se o valor de C_a na equação 4.10

$$C_a = 17.524.497155373152N \cdot s/m \quad (4.16)$$

4.3 Análise transiente

Para averiguar a eficácia do AMS, modelado anteriormente, analisou-se a estrutura sujeita a um carregamento do vento harmônico, já que os parâmetros ótimos do amortecedor, estabelecidos por Den Hartog [8], são especificados baseando-se deste pressuposto da carga. Análises similares foram realizadas por Shzu et al [12].

Esta excitação dinâmica imposta à estrutura foi modelada de modo a representar o efeito da ação da força do vento atuando na torre do aerogerador. Nas análises transientes, o tempo total de análise foi de 20 segundos e um passo de tempo de 0,1 segundos.

A cor vermelha e azul, nos gráficos a seguir, indica o deslocamento sem e com a presença do amortecedor de massa sintonizada, respectivamente. A figura 4.3 re-

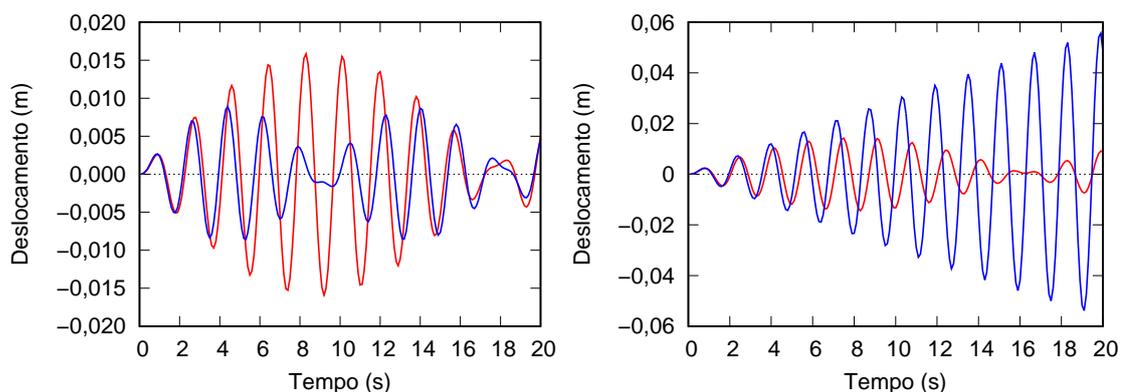


Figura 4.3: Deslocamento em função do tempo no primeiro modo de vibração (a esquerda) e no segundo modo de vibração (a direita).

presenta o deslocamento do topo da torre quando $\omega_f = 0,51533$ Hz. Nota-se que a presença do controle estrutural ameniza os deslocamentos laterais da estrutura. Observando a figura 4.3, a direita, percebe-se que a estrutura entra em ressonância,

quando $\omega_f = 0,63315$ Hz. Com a presença do AMS os deslocamentos da estrutura diminuem, evidenciando assim a sua principal finalidade que é de diminuir a amplitude do pico de ressonância. Esse era o principal efeito esperado no sistema

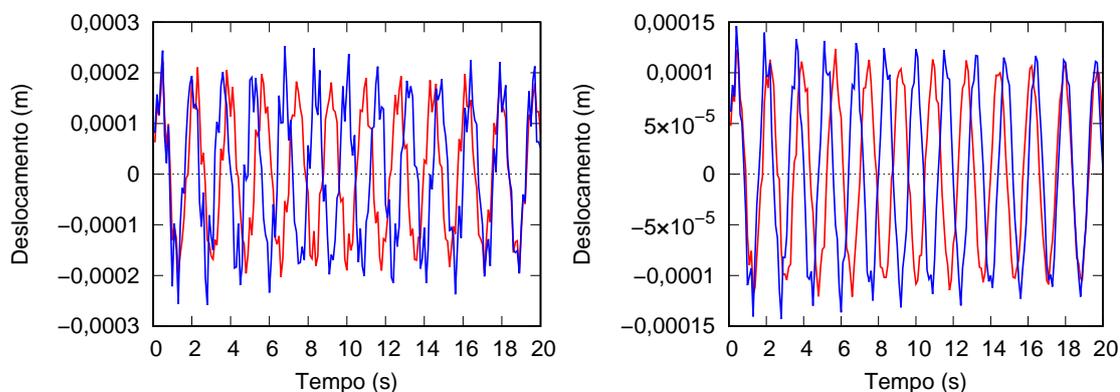


Figura 4.4: Deslocamento em função do tempo no terceiro modo de vibração (a esquerda) e no quarto modo de vibração (a direita)

A figura 4.4 da esquerda simula o deslocamento do topo da torre quando $\omega_f = 3,3429$ Hz. Verifica-se que a presença do controle estrutural reduz os deslocamentos da torre, sendo que estes são muito mais baixos quando comparados ao primeiro e segundo modos de vibração. Já a figura 4.4 da direita descreve o deslocamento do topo da torre quando $\omega_f = 3,8674$ Hz. Constata-se que a amplitude de oscilação diminui com a presença do controle estrutural.

Considerações finais

A torre foi modelada como elemento de viga com uma massa concentrada no topo, no pacote de elementos finitos ANSYS R19.0. Foram realizadas análises modais e transientes.

Na análise modal obteve-se as frequências de vibração da estrutura. Com estes valores, modelou-se o carregamento harmônico e a frequência natural do amortecedor de massa sintonizada.

Com base nos parâmetros ótimos do AMS definidos por Den Hartog [8], modelou-se o dispositivo de controle estrutural.

Quando aplicada a carga devida a um vento harmônico e sintonizado com a frequência natural da estrutura, foi possível observar que o AMS reduz significativamente as amplitudes de vibração, visto que o amortecedor foi sintonizado à frequência do vento. Verificando assim numericamente a eficácia do dispositivo de controle estrutural AMS em uma torre eólica.

Os resultados obtidos estão de acordo com referências da área, mas alguns pontos mostram resultados diferentes, como esperado, devido a diferenças na geometria e na modelagem do amortecedor de massa sintonizada no pacote de elementos finitos ANSYS.

Referências Bibliográficas

- [1] L. F. M. P. OLIVEIRA. Análise do comportamento dinâmico de torres de geradores eólicos. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.
- [2] W. M. PEREIRA. Influência do controle estrutural na otimização de torres de sustentação de aerogeradores. Master's thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- [3] C. F. DELLEZZOPOLLES. Análise dinâmica de torre de energia eólica. Master's thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- [4] J. C. MENDES, T. F.; MENEZES. Estudo de sensibilidade e dimensionamento estrutural de torres tubulares para geradores eólicos. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2010.
- [5] L. A. L. VALENCIA. Controle de vibrações em vigas metálicas com distintas configurações de apoio utilizando amortecedores de massa sintonizados. Master's thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- [6] L. S. ALVES. Controle de vibrações em edifícios altos sujeitos a vento ou terremoto. *UFG*, 2015.
- [7] Y. H. CHEN, Y. H.; HUANG. Timoshenko beam with tuned mass dampers and its design curves. *Journal of Sound and Vibration*, 2004.
- [8] P. J. DEN HARTOG. *Mechanical vibrations*. McGraw-Hill, Nova York, E.U.A, 3 edition, 1956.
- [9] S. M. A. BENEVELI. *Controle híbrido para atenuação de vibrações em edifícios*. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [10] A. S. SIRQUEIRA. Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de turbinas eólicas. Master's thesis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [11] S. M.; W. M. ÁVILA. Controle de vibrações em torres eólicas submetidas à ação de cargas harmônicas utilizando amortecedor de massa sintonizado na forma de pêndulo. *10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações DICON*, 2011.
- [12] M. A. M. *et al* SHZU. Estudo de sensibilidade e dimensionamento estrutural de torres tubulares para geradores eólicos. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2010.