



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia**

**INFLUÊNCIA DO CONTROLE ESTRUTURAL NA
OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE SUSTENTAÇÃO DE
AEROGERADORES**

**Autor: William Macedo Pereira
Orientador: Dra. Maura Angélica Milfont Shzu
Coorientador: Dra. Suzana Moreira Avila**

**Brasília, DF
2015**



WILLIAM MACEDO PEREIRA

**TITULO: INFLUÊNCIA DO CONTROLE ESTRUTURAL NA OTIMIZAÇÃO DE
TORRES DE SUSTENTAÇÃO DE AEROGERADORES**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dra. Maura Angélica Milfont Shzu

Coorientador: Dra. Suzana Moreira Avila

**Brasília, DF
2015**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Pereira, William Macedo.

Título da Monografia: Influência do Controle Estrutural na otimização de torres de sustentação de aerogeradores / William Macedo Pereira . Brasília: UnB, 2015. 96 p.: il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Dra. Maura
Angélica Milfont Shzu /Dra. Suzana Moreira Avila

1. Turbina Eólica. 2. Controle Estrutural. 3. Otimização Estrutural I. Avila Moreira, Suzana. II. Título.

CDU Classificação



INFLUÊNCIA DO CONTROLE ESTRUTURAL NA OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE SUSTENTAÇÃO DE AEROGERADORES

William Macedo Pereira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 01/07/2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.^a Dra. : Maura Angélica Milfont Shzu, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dra. :, Suzana Moreira Avila UnB/ FGA
Coorientador

Prof. Dr. : Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ ENM
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

Esse trabalho é dedicado à minha mãe, Vera Lúcia Macedo, sem você nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela saúde, força e oportunidades.

A minha mãe Vera Lucia Macedo Pereira, minha avó Regina Mendes Macedo e tios Márcio e Mauro Macedo Pereira, pela força, incentivo e amparo em todos esses anos de curso.

A minha prima Valdirene Rodrigues Macedo e amiga Janaina Ramos, por terem me introduzido no fascinante mundo da leitura e saber.

A todos os meus amigos e colegas de Engenharia, em especial Bruno Batista Suehara, Cleiton da Silva Gomes, Claudia Sampaio Rezende, Gabrielle Monique Baracho, Jose Carlos Teles, Júlio César do Nascimento, Ketlly Cristina de Oliveira, Luiz Eduardo Nunes Albuquerque, Natalia Seyko Aoyama, Orlânia Alves Rodrigues e Túlio Henrique Pedra pelo compartilhamento de alegrias e tristezas, vitórias e derrotas. Todo esse período foi uma rica e construtiva experiência de vida ao lado de vocês.

Aos meus amigos Aline Gomes Peres e Raymeson Rodrigues de Melo, pela amizade, companheirismo e apoio.

A minha professora orientadora, Prof^ª doutora Suzana Moreira Avila, por me acompanhar desde o início da graduação, agradeço a paciência, dedicação e ensinamentos que solidificaram a minha formação de engenheiro.

A minha segunda professora orientadora, Prof^ª doutora Maura Milfont Shzu, pelos ensinamentos de engenharia, paciência e disponibilidade e que me ajudou muito a desenvolver como pessoa.

Agradeço a CAPES/CSF pela Bolsa de Graduação Sanduíche na Università degli Studi di Roma – La Sapienza.

RESUMO

A energia eólica é baseada no fluxo do ar na atmosfera, onde a energia cinética do vento é capturada pelas pás do aerogerador e posteriormente convertida em trabalho de eixo no rotor para se obter energia elétrica no aerogerador. A principal característica da energia eólica é que essa fonte de energia é limpa, renovável e causa poucos impactos ambientais. Os aerogeradores normalmente são dispositivos de eixo horizontal, onde as turbinas estão convencionalmente posicionadas na extremidade superior da torre de sustentação do aerogerador. As torres de sustentação dos aerogeradores são estruturas flexíveis, esbeltas e expostas a vibrações excessivas provenientes da interação entre o vento e a estrutura. Deste modo um projeto de torre eólica deve considerar a análise dos efeitos estáticos e dinâmicos. No presente trabalho será executada a análise de uma torre de sustentação de aerogerador com dimensões teóricas por meio do software ANSYS R13.0 e da mesma torre com a integração de um sistema de controle. Para os dois casos será feito um estudo de otimização em busca do menor volume a fim de avaliar a influência do sistema de controle sobre o resultado ótimo do projeto. O processo de otimização estrutural da torre foi realizado devido a notória importância da torre, no custo total do aerogerador, podendo alcançar até 30% do custo total do aerogerador. O modelo da torre proposto, foi modelado com elemento de viga sem as pás do rotor e a utilização de um elemento de massa concentrada na extremidade superior da torre para representar a nacelle do aerogerador. Neste trabalho foram executadas análises estruturais estática, modal e transiente, assim como processos de otimização em cada um desses regimes. O dispositivo de controle estrutural utilizado neste trabalho será um pêndulo, que consiste essencialmente de um sistema massa-mola-amortecedor, que será conectado a estrutura da torre e sintonizado em uma frequência particular de interesse, com o objetivo de fazer o dispositivo vibrar fora de fase com o movimento causado pela interação vento-estrutura, e assim transferir a energia vibratória para o próprio pêndulo.

Palavras-chave: Aerogerador, Controle Estrutural, Otimização Estrutural.

ABSTRACT

Wind power generation is based on the atmospheric airflow, where the kinetics energy of the wind is converted into electrical power by a set of blades and rotor. The most important feature of this kind of wind power generation is that it is a renewable energy source, clean and of low environmental impact. Usually these turbines are horizontal type, and conventionally mounted on the top of the tower. The great height of the tower structure is flexible and exposed to excessive vibration caused by the interaction structure-wind. Therefore, a realistic and optimum tower project must take into account the dynamics effects on the structure and its appropriate geometry. In this work will be carried out the analysis of optimization process of the wind turbine tower with theoretical dimensions on the software ANSYS R13.0, with beam elements and subsequently the analysis of the connection of a structural control system will be conducted to verify the effects of this system on the structural optimization process. The structural optimization process was done due to the importance of the tower in the total cost of the wind turbine system. Which may reach up to 30% of the wind turbine total cost. The model of wind turbine tower proposed in this work was done with a simplified model of the tower, without blades and with a mass element attached at the tower top to represent the nacelle and blades mass. In this work, were performed static, modal and transient structural analysis, and its respective optimization analysis. The structural device of vibration control proposed in this work is a pendulum. That consists, basically, of a mass, spring and a damper, which are connected to the structure of the tower, tuning the frequency of the pendulum to a particular frequency, with the objective of making it oscillate out of the phase with the movement caused by the wind-tower interaction, transferring the energy to itself.

Keywords: Wind Turbine, Structural Control, Structural Optimization.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área frontal efetiva projetada
C_a	Amortecimento modal do aerogerador
C_p	Amortecimento do pêndulo
C_d	Coefficiente de arrasto de Davenport
\mathbf{C}	Matriz de amortecimento
$\bar{\mathbf{C}}$	Matriz de amortecimento generalizada
d	Diâmetro da torre
$d^{(j)}$	Vetor de direção de busca
f	Frequência em hertz
$f(x)$	Função a ser minimizada
f_0	Função objetivo de referencia
f_1	Restrição da primeira frequência natural
$f^{(b)}$	Melhor arranjo encontrado
$f^{(j-1)}$	Arranjo da interação anterior
F	Amplitude do carregamento harmônico
F_G	Força global do vento
g	Aceleração da gravidade
$g_j(x)$	Restrição de igualdade
$h_k(x)$	Restrição de desigualdade
$h(n)$	Número de variáveis de projeto
$H_Y(\omega)$	Função resposta do aerogerador no domínio da frequência
$H_\theta(\omega)$	Função resposta do pêndulo no domínio da frequência
h	Altura total de acordo com a ABNT-NBR6123
\mathbf{I}	Matriz identidade
K_a	Rigidez modal do aerogerador
K_p	Rigidez do pêndulo
\mathbf{K}	Matriz de rigidez do aerogerador
$\bar{\mathbf{K}}$	Matriz de rigidez generalizada
L	Comprimento do pêndulo
l_1	Diâmetro de acordo com a ABNT-NBR6123
M_a	Massa modal do aerogerador

M_p	Massa do pêndulo
M_t	Massa Total do aerogerador
M	Massa do aerogerador
\bar{M}	Matriz de massa generalizada
$\mathbf{P}(t)$	Carregamento dinâmico externo
\bar{P}	Vetor de carregamento dinâmico externo
q	Pressão dinâmica dos ventos
Re	Número de Reynolds
S_0	Densidade espectral do ruído branco
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator rugosidade
S_3	Fator estatístico
$S_i(f)$	Densidade espectral longitudinal
$S_w(f)$	Densidade espectral da força do vento
S_j	Tamanho do passo
S_{Max}	Tamanho máximo do passo na direção de busca.
t	Tempo
T	Período Natural de vibração da estrutura
$V(10)$	Velocidade média horária de vento em 10 m de altura
V_0	Velocidade básica do vento
V_K	Velocidade característica do vento
y	Deslocamento
\dot{y}	Velocidade
\ddot{y}	Aceleração
Δ	Ângulo de fase
$\theta(t)$	Deslocamento angular do pêndulo
Ψ	Modo de vibração
Φ	Matriz modal
ρ_a	Massa específica do ar
σ	Tensão máxima de von mises
σ_{Max}	Tensão máxima admissível
$\sigma_{última}$	Tensão última

δ	Deslocamento máximo no topo da torre
δ_{\max}	Deslocamento máximo admissível no topo da torre.
τ	Tolerância da função objetivo
μ	Razão entre a massa do pêndulo e a massa do aerogerador
ω_i	Frequência natural de vibração
x_i	Variável de projeto
x_i	Limite inferior das variáveis de projeto
x_s	Limite superior das variáveis de projeto
Z	Altura da torre

SIGLAS

CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
GWEC	Global Wind Energy Council
GDL	Graus de Liberdade
MEF	Método dos Elementos Finitos
MME	Ministério de Minas e Energia
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes alternativas de Energia Elétrica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Potência Instalada Global acumulada entre 1997 e 2014.....	2
Figura 2: Moinho de vento holandês típico do início do século XX.	9
Figura 3: Aerogeradores.....	11
Figura 4: Protótipo de aerogerador ST10.....	12
Figura 5: Principais subsistemas de um aerogerador de eixo horizontal.	13
Figura 6: Aerogeradores, H-Darrieus, Darrieus Giromill e Savonius respectivamente.....	14
Figura 7: Dispositivo de eixo horizontal utilizada nos Estados Unidos para bombear água ...	15
Figura 8: (a) Aerogerador com torre tubular cônica; (b) Aerogerador com torre treliçada.	16
Figura 9: Torre Eólica Estaiada	17
Figura 10: Fases da Montagem de um Aerogerador	18
Figura 11: Torre de sustentação de aerogerador em colapso	22
Figura 12: Aerogerador Modelado como um sistema de um grau de liberdade	28
Figura 13: Modelagem do pêndulo linear	28
Figura 14: Regiões de domínio viável e inviável.....	34
Figura 15: Conceitos de mínimo local e mínimo global	35
Figura 16: Elemento BEAM 188	37
Figura 17: Elemento BEAM 4	38
Figura 18: MASS21	39
Figura 19: Elemento COMBIN14.....	39
Figura 20: Fluxo do processo de execução de otimização no ANSYS.....	41
Figura 21: Torre modelada com elemento de massa na extremidade superior.....	45
Figura 22: Carregamentos aplicados na análise estática.	47
Figura 23: Isopletas de velocidade básica.....	48
Figura 24: Força global aplicada ao longo da torre na análise estática.....	52
Figura 25: Espectro de Davenport	54
Figura 26: Deslocamento máximo projeto inicial.....	55
Figura 27: Tensão de von mises Torre Inicial.....	55
Figura 28: Variação do volume em função da variação do raio	60
Figura 30: Deslocamento em Função do tempo para o projeto de torre inicial	69
Figura 31: Projeto ótimo sem Controle.....	72
Figura 32: Projeto ótimo com controle	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO – ENERGIA EÓLICA.....	1
1.2 OBJETIVOS	7
1.2.1 Objetivo Geral:.....	7
1.2.2 Metodologia:	7
1.2.3 Objetivos Específicos:	7
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DO DESENVOLVIMENTO DE AEROGERADORES.....	9
2.2 DESCRIÇÃO DOS AEROGERADORES	12
2.3 TORRES DE SUSTENTAÇÃO DE AEROGERADORES HAWT.....	15
2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES DE AEROGERADORES	19
2.4 CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM AEROGERADORES.....	21
3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	25
3.1 ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA	25
3.1.1 Integração Numérica.....	25
3.1.2 Superposição Modal.....	26
3.2 Solução Harmônica do Aerogerador.	27
3.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	30
3.3.1 Introdução a Otimização Estrutural	30
3.3.2 Considerações Iniciais.....	30
3.3.3 Função Objetivo.....	31
3.3.4 Variáveis de Projeto	31
3.3.5 Restrições de Projeto.....	32
3.3.6 Formulação do Problema de Otimização	33
3.3.7 Projetos Viáveis e Inviáveis	34
4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	36
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
4.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	36
4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL	37
4.3.1 BEAM188	37
4.3.2 BEAM4	37
4.3.3 MASS21.....	38
4.3.4 COMBIN14.....	39
4.4 ANÁLISE DINÂMICA.....	40
4.5 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO.....	41
5. ANÁLISE NUMÉRICA.....	45
5.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	45
5.2 DISCRETIZAÇÃO DA ESTRUTURA.....	46
5.3 MODELAGEM DO CARREGAMENTO ESTÁTICO	47
5.3.1 Carregamentos aplicados na torre	47
5.3.2 Modelagem do Carregamento Proveniente da Ação do Vento na Estrutura.	50
5.4 ESPECTRO DE POTÊNCIA: MODELO DE DAVENPORT	53
5.5 PRIMEIRO MODELO NUMÉRICO: ANÁLISE ESTÁTICA	54
5.5.1 Análise estática linear do projeto inicial da torre.....	54
5.5.2 Descrição do modelo numérico.....	56
5.5.3 Aplicação da otimização	58
5.6 SEGUNDO EXEMPLO NUMÉRICO: ANÁLISE MODAL.....	61
5.6.1 Análise modal do projeto inicial da torre.....	61
5.6.2 Aplicação de Otimização	62
5.7 TERCEIRO EXEMPLO NUMÉRICO: TORRE EM TRONCO DE CONE.....	63
5.8 QUARTO MODELO NUMÉRICO: ANÁLISE TRANSIENTE	65
5.8.1 Descrição do modelo numérico.....	65

5.8.2 Aplicação da otimização	67
5.9 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CONTROLE ESTRUTURAL NA OTIMIZAÇÃO	69
5.9.1 Descrição do problema	69
5.9.2 Obtenção dos parâmetros do pêndulo	70
5.9.3 Modelagem do Pêndulo	70
5.9.4 Análise da Influência do Pêndulo no processo de otimização	71
6. CONCLUSÕES.....	73
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO – ENERGIA EÓLICA

Atualmente as fontes de energia limpas e renováveis tem assumido um importante papel como alternativa as fontes de energia de origem não renovável como os combustíveis fósseis. O aumento do consumo dessas fontes de energia não renováveis é resultado do crescimento tecnológico e populacional ocorrido nas últimas décadas, e em consequência desse processo, observa-se o esgotamento desses recursos energéticos, e por extensão, o aumento dos impactos ambientais provocados por meio do consumo desses combustíveis para geração de energia elétrica ou transporte, entre esses impactos ambientais podem ser citados: a emissão de gases de combustão na atmosfera, como dióxido de carbono, metano e outros gases, que podem provocar o aquecimento global e poluição do ar; chuva ácida; diminuição da camada de ozônio; destruição de florestas e emissão de particulados em geral.

Nesse contexto de busca por uma fonte de energia limpa e renovável, que provoque poucos impactos ambientais, a energia eólica aparece como uma alternativa viável as tradicionais formas de geração de energia elétrica, pois é uma fonte de energia limpa, renovável e que não polui o ar ou emite gases de efeito estufa diretamente. A energia eólica ainda possui a vantagem de ser uma fonte de energia local, independente do cenário internacional, natural e disponível (Dincer, 2011).

A maturidade da energia eólica como fonte de produção de energia é uma realidade em escala global. Isto pode ser observado pelo número de parques eólicos ligados a rede elétrica em todos os níveis de tensão (CGEE, 2012). Várias iniciativas de aproveitamento da energia eólica foram consolidadas ao redor do mundo, principalmente no continente europeu, Estados Unidos da América e China, onde os investimentos na geração de energia por fontes de energias renováveis são significativos quando comparados aos recursos investidos nessa área em escala global (Dellezzopolles, 2011).

Na Figura (1) pode-se observar o desenvolvimento mundial da capacidade instalada para o aproveitamento da energia eólica entre os anos de 1997 e 2014.

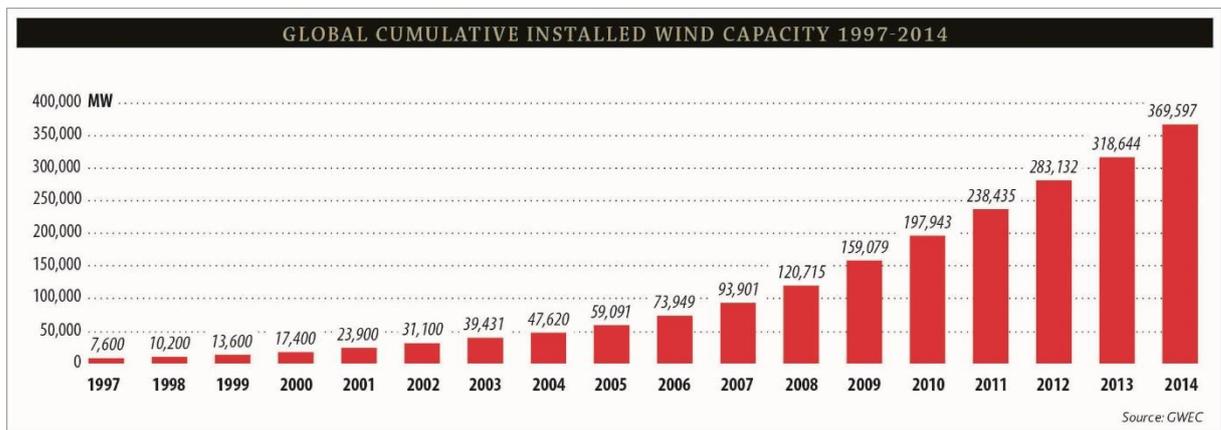


Figura 1: Potência Instalada Global acumulada entre 1997 e 2014 (GWEC, 2015).

No final de 2014, a potência mundial instalada por meio de turbinas eólicas era cerca de 369,5 GW. Dados do GWEC mostram que 2014 foi o ano recorde em instalação e operação de aerogeradores, representando uma potência instalada superior 50 GW, valor significativamente superior ao atingido no ano de 2013, que foram 35,5 GW de potência instalada, representado assim o crescimento cumulativo de mercado superior a 16% no período. Na Figura (2) pode ser observada a distribuição da capacidade instalada por região entre os anos de 2006 e 2014.

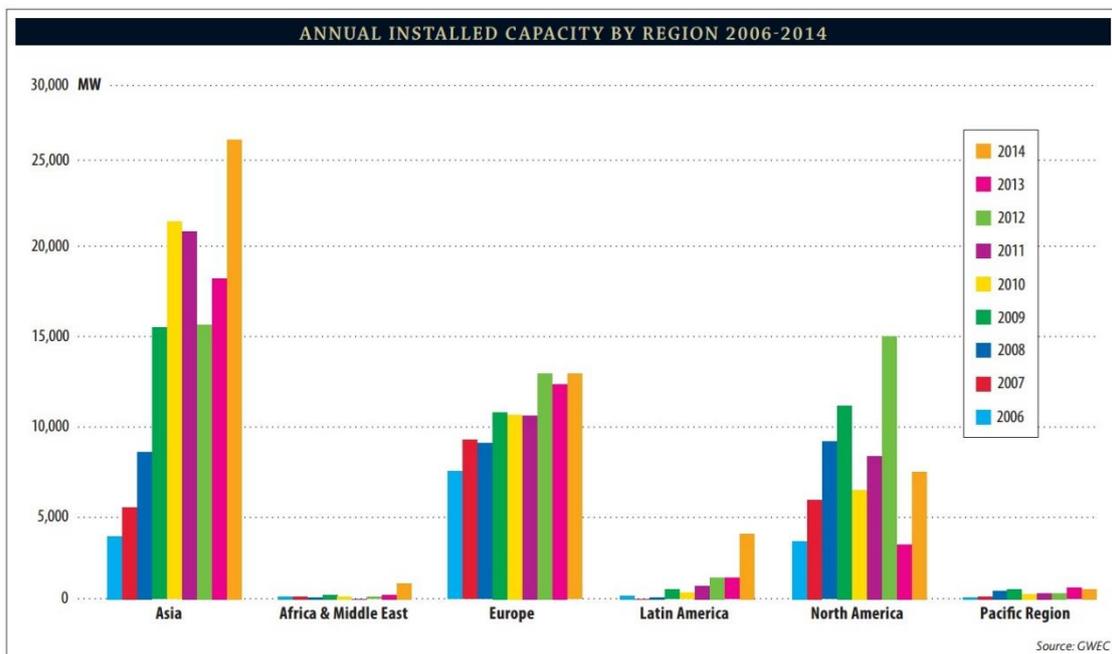


Figura 2: Capacidade Instalada anual por Região entre os anos de 2006 e 2014 (GWEC, 2015).

Pode ser observado na Fig.(2) que entre os anos de 2009 e 2011 a capacidade instalada anual na Europa permaneceu praticamente constante a cada ano, é essa estabilidade no mercado europeu é uma consequência da política de longo prazo adotado pelo continente para a utilização das fontes de energia renováveis e as incertezas econômicas que assolavam o continente nesse período. Apesar das incertezas econômicas no continente europeu, em 2014, aproximadamente 12,8 MW de potência foi instalada na Europa, o que representa um investimento entre €13 bilhões e €18 bilhões . Hoje a energia eólica corresponde a 10.2% da demanda de energia elétrica da Europa (GWEC, 2015).

Na América Latina, a capacidade instalada para o aproveitamento de energia eólica tem crescido significativamente nos últimos anos, como uma complementação as tradicionais fontes de energia hidroelétrica, biomassa e termoeétrica, e esse crescimento tem sido liderado pelo Brasil, que é o país líder em capacidade instalada para o aproveitamento de energia eólica na América Latina e Caribe, na Tabela (1) é possível verificar a capacidade instalada em MW na América Latina e Caribe entre os anos de 2013 e 2014.

Tabela 1: Capacidade Global instalada na América Latina e Caribe em MW (GWEC, 2015).

País	Final de 2013	Novas em 2014	Total em 2014
Brasil	3,466	2,472	5,939
Argentina	218	53	271
Costa Rica	148	50	198
Nicarágua	146	40	186
Chile	331	506	836
Uruguai	59	405	464
Caribe	250	-	250
Outros	55	28	83
Total	4.777	3.7749	8.526

Na Tabela (1) pode-se constatar que no ano de 2015, a capacidade instalada na América Latina era de aproximadamente 8,5 GW. É que o Brasil foi um dos grandes responsáveis por essa capacidade instalada, pois somente o Brasil contribui com uma capacidade instalada ou em instalação de aproximadamente 5,9 GW no período. A expectativa é que a capacidade instalada para o aproveitamento da energia eólica na América Latina cresça ainda mais nos próximos anos, devido à necessidade de se diversificar a matriz energética da região. A Tabela (2), apresenta a capacidade instalada por estado no Brasil em 2014.

Tabela 2: Capacidade Instalada por estado no Brasil em 2014 (GWEC, 2015)

Estado	Capacidade instalada acumulada em 2014 (GW)
Bahia	931.4
Ceará	1.232.2
Paraíba	69.0
Pernambuco	104.7
Piauí	88.0
Paraná	2.5
Rio de Janeiro	28.1
Rio Grande do Norte	2.092.0
Rio Grande do Sul	1.138.0
Santa Catarina	236.4
Sergipe	34.5
Total	5.938.5

Na Tabela (2) pode-se observar que a região nordeste do Brasil é a região com o maior número de parques eólicos instalados. Dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Eletrobrás, 2001) mostram que essa região do interior do Nordeste é a região que detém o maior potencial eólico brasileiro. Entretanto, essa é uma região historicamente marcada por carências sociais e econômicas (CGEE, 2012). É a instalação dos parques eólicos na região tem sido um componente indispensável para auxiliar no desenvolvimento socioeconômico na região.

No Brasil, o aproveitamento de energia eólica tomou impulso a partir do ano de 2004 com o advento do Programa de incentivo as fontes alternativas de energia elétrica, denominado Proinfa, que buscava diversificar e promover uma matriz energética brasileira limpa e renovável (MME, 2010). Entretanto, apenas a partir de 2009 essa fonte de energia tornou-se competitiva frente às alternativas de geração de energia elétrica e passou a ser comercializada em um mercado regulado (CGEE, 2012).

O Brasil possui um potencial eólico estimado em 272 TWh, medido em torres de até 50 metros de altura. Este potencial equivale a uma capacidade instalada de 143 GW, tal potencial energético pode aumentar até 3 vezes se as medições forem realizadas em torres com alturas entre 80 e 100 metros e ventos com características adequadas ao aproveitamento energético (Tolmasquim, 2011).

Os aerogeradores são os dispositivos destinados a converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. A energia eólica é produzida pelo fluxo de ar na atmosfera, por um processo no qual a energia cinética dos ventos é convertida em trabalho de eixo, que por sua vez é transformado em energia elétrica no gerador do aerogerador. Nos aerogeradores uma

turbina eólica está localizada no topo de uma torre de sustentação. A esbeltez acentuada adiciona complexidade ao projeto estrutural dessas torres eólicas, deste modo um projeto de torre realista e ótimo deve considerar a análise dos efeitos dinâmicos e uma geometria apropriada (Feijó, 2010).

De acordo com Quilligan et al. (2012), as torres de sustentação representam aproximadamente 30% do custo de todo o aerogerador, nesse sentido considerações em relação ao projeto ótimo dessas torres precisam ser realizados, tendo em vista a diminuição dos custos com material na concepção da torre. A otimização estrutural aparece como uma técnica adequada para auxiliar projetistas na obtenção de um projeto como uma geometria caracterizada como ótima.

Essas torres são estruturas altas, esbeltas e flexíveis, projetadas para resistir às cargas estáticas, entretanto, considerações sobre os efeitos dinâmicos provenientes da interação fluido-estrutura que o vento exerce sobre a torre precisam ser considerados, visto que a estrutura de uma torre de sustentação de aerogeradores frequentemente está submetida à ação de vibrações provenientes da ação da pressão que vento exerce sobre a torre ou vibrações provenientes do próprio funcionamento da turbina.

Essas vibrações indesejáveis do ponto de vista estrutural, podem causar danos à estrutura da torre devido ao elevado valor dos esforços solicitantes induzidos. Essas vibrações ainda podem provocar fadiga dos elementos estruturais da torre, além de comprometer a segurança de todo o aerogerador, pois uma vez que a torre foi excitada, a estrutura da torre propaga a energia vibratória pelas pás, turbina e fundações. Essas vibrações podem provocar o fenômeno da ressonância, ocasionando rupturas e até mesmo o colapso estrutural da torre de sustentação.

Para diminuir os efeitos dessas vibrações excessivas na estrutura da torre, uma técnica de controle estrutural pode ser utilizada. O controle estrutural é a técnica que busca reduzir a demanda de dissipação de energia nos membros estruturais sob a ação de forças externas (Lima, 2007). O controle estrutural, essencialmente, promove uma alteração nas propriedades de amortecimento e rigidez da estrutura. A alteração dessas propriedades de amortecimento e rigidez pode ocorrer por meio da adição de dispositivos externos ou pela ação de forças externas (Avila, 2002). Esses sistemas de controle podem ser classificados como: controle passivo, controle ativo, controle híbrido e semiativo.

Os sistemas de controle passivo e ativo representam dois extremos entre as estratégias de controle estrutural existentes (Carneiro, 2009). Os sistemas de controle passivos são independentes de uma fonte externa de energia para seu funcionamento. Por outro lado, os sistemas de controle ativo são compostos por atuadores que aplicam uma força na estrutura, e dependem do fornecimento de energia por uma fonte externa. Existem ainda, sistemas que incorporam características dos dois sistemas de controle mencionados, sendo eles o controle híbrido e o semiativo.

Os sistemas de controle passivos são os dispositivos de controle menos complexos e menos caros. A simplicidade de projeto e execução, somados a confiabilidade desses dispositivos de controle, faz com que tais dispositivos sejam os mais utilizados na prática (Zuluaga, 2007). Os dispositivos de controle passivos são projetados para operar no controle de estruturas que vibrem predominantemente em um dado modo de vibração, e essa é a principal desvantagem dos dispositivos de controle passivos em relação aos ativos, pois quando a estrutura é submetida a uma excitação fora da frequência de projeto, o dispositivo passivo diminui a eficiência do seu desempenho.

Os sistemas de controle ativo, todavia, não apresentam limitações quanto a excitações fora da frequência de projeto, e possuem a vantagem de poderem se readequar, caso necessário, a novas características do carregamento ou de estrutura.

Entre as desvantagens dos sistemas de controle ativo, cita-se a necessidade da utilização de algoritmos de controle e a demanda de uma grande quantidade de energia nos atuadores para a geração das forças de controle (Zuluaga, 2007).

Os sistemas de controle que incorporam características dos sistemas de controle ativos e passivos são denominados dispositivos de controle híbridos, esses sistemas mesclam vantagens dos sistemas de controle ativo como a cobertura de uma maior faixa de frequência de excitação e a vantagem dos sistemas de controle passivos, como diminuição das forças produzidas pelos atuadores e conseqüentemente diminuição da demanda de energia proveniente de uma fonte externa.

Já os sistemas de controle semiativos, não necessitam da adição de energia no sistema estrutural controlado, entretanto, possuem propriedades que podem ser modificadas conforme a necessidade de readequação de novos parâmetros de carregamento e estrutura, essas propriedades quando controladas de forma ótima reduzem significativamente a resposta do sistema (Zuluaga, 2007).

Entre os sistemas de controle citados anteriormente, destaca-se um sistema de controle passivo pendular. O pêndulo em sua forma mais simples pode ser analisado como um sistema massa, mola e amortecedor, onde o pêndulo é conectado a um sistema vibrante, com a intenção de reduzir a propagação de energia vibratória nos membros estruturais sob a ação de um carregamento ou excitação externa.

Nesse contexto que esse trabalho de conclusão de curso se enquadra. A proposta do presente de trabalho é realizar a análise estrutural da torre de sustentação de um aerogerador em regime estático e dinâmico e posteriormente verificar como um sistema de controle passivo conectado a estrutura da torre influenciará na obtenção de um projeto de torre ótimo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral:

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência de um sistema de controle passivo pendular no processo de otimização estrutural de uma torre de sustentação de aerogerador.

1.2.2 Metodologia:

Esse trabalho busca analisar o comportamento estático e dinâmico de uma torre de sustentação de aerogerador, com e sem a conexão de um sistema de controle passivo pendular para o controle de vibrações indesejáveis na torre. Deste modo, busca-se entender como o sistema controle influenciará no processo de otimização estrutural quando se utiliza um algoritmo de otimização de primeira ordem disponível no ANSYS R13.0.

1.2.3 Objetivos Específicos:

Apresenta-se a seguir os objetivos específicos desse trabalho:

Realizar a modelagem da torre de sustentação do aerogerador com e sem a conexão de um sistema de controle via Método dos Elementos Finitos (MEF) no pacote computacional ANSYS R13.00, utilizando elementos de viga. Realizar análises estática e dinâmica e posteriormente submeter a torre a um processo de otimização estrutural em cada um desses regimes. Por fim, será analisado a influência da aplicação de um sistema de controle passivo pendular conectado a torre no processo de otimização estrutural.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente projeto de graduação é composto por seis capítulos dispostos a seguir:

O primeiro capítulo trata-se de uma introdução geral sobre o contexto atual da produção de energia eólica no Brasil e no mundo. Neste capítulo dados setoriais fornecidos pelas entidades representativas do setor são apresentados. Em seguida neste mesmo capítulo, são apresentados os objetivos desse projeto de graduação e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde é feita uma descrição do que é uma torre eólica, seu desenvolvimento ao longo da história e sua modelagem. Neste capítulo também são apresentadas diversas pesquisas desenvolvidas no campo da dinâmica estrutural de torres eólicas, as respostas destas estruturas quando submetidas a excitações dinâmicas e os dispositivos de controle adequados para essas estruturas. Neste mesmo capítulo, são apresentados conceitos relativos a otimização estrutural e as pesquisas relevantes no campo da otimização estrutural de torres de sustentação de aerogeradores.

No terceiro capítulo é apresentada a fundamentação teórica que serviu de alicerce para o desenvolvimento do presente trabalho. Neste capítulo são descritas as formulações matemáticas, as considerações e simplificações realizadas durante este projeto.

No quarto capítulo é apresentado o pacote computacional utilizado para realizar as análises estruturais do trabalho, suas funcionalidades e algoritmos.

O quinto capítulo apresenta os resultados numéricos obtidos neste trabalho de conclusão de curso.

O sexto capítulo e último, apresenta as conclusões obtidas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DO DESENVOLVIMENTO DE AEROGERADORES

Os primeiros registros históricos da utilização de moinhos de vento datam de 1700 A.C no Afeganistão e eram dispositivos de eixo vertical utilizados para moer grãos. Os primeiros registros da utilização de moinhos de eixo horizontal foram encontrados em documentos históricos na Pérsia, Tibete e China por volta de 1000 A.C eram utilizados para bombear água e moer grãos (Ackermann, 2002). A configuração de moinhos de eixo horizontal foi disseminada por diversos países do Mediterrâneo, Oriente Médio e Europa por influência das cruzadas que disseminaram a tecnologia dos moinhos de vento por esses diversos países.

Na Europa, o desempenho 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. Esses moinhos não eram usados apenas para moer grãos, mas também para bombear água. Por volta do ano de 1800 aproximadamente 20.000 moinhos modernos estavam em operação na França e por volta de 90% da energia utilizada na indústria holandesa nesse período era proveniente da energia do vento (Ackermann, 2002). A Figura (2) ilustra um moinho de vento holandês típico do início do século XX.



Figura 2: Moinho de vento holandês típico do início do século XX (Iammadein, 2015).

O primeiro relato da construção de uma turbina eólica com a finalidade de gerar energia elétrica data de 1891, foi conduzida pelo físico dinamarquês Paul La Cour. As pesquisas desenvolvidas por Paul La Cour na aerodinâmica das pás foram inovadoras na época, e resultou

em dois modelos de turbina financiadas pelo governo dinamarquês em 1891 e 1897 (Ackermann, 2002). Essas Turbinas eram muito parecidas com moinhos de vento e foram montadas sobre um prédio de dois andares (Dellezzopolles, 2011).

A empresa dinamarquesa *F.L SMIDTH* pode ser considerada a precursora dos aerogeradores modernos, entre os anos de 1941 e 1942, essa empresa construiu aerogeradores que utilizavam aerofólios no lugar das tradicionais pás de arrasto e que possuíam mecanismos para controlar a velocidade do rotor da turbina. Na Dinamarca, o acelerado desenvolvimento da tecnologia dos aerogeradores foi motivado pela necessidade de suprir os cortes de energia durante a primeira e segunda guerra mundial. No mesmo período, a empresa americana *MORGAN SMITH* construiu uma turbina eólica considerada gigante para os padrões de turbina da época. Essa turbina possuía um rotor com 53 metros de diâmetro e uma metodologia diferente de funcionamento, onde o rotor vertical recebia o vento por trás da torre de sustentação do aerogerador e o controle de velocidade do rotor se dava pela variação do ângulo de ataque das pás da turbina (Ackermann, 2002).

Depois da segunda guerra mundial, o interesse pela energia eólica diminuiu devido à supremacia do petróleo como fonte energética. Os investimentos em energia eólica foram retomados apenas em meados de 1970, influenciado pelos elevados preços do petróleo decorrente da crise do petróleo que ocorria na época. Nesse período, investimentos em pesquisa e desenvolvimento dos aerogeradores foram retomados por entidades estatais e privadas em países como Alemanha, Estados Unidos e Dinamarca. As pesquisas e desenvolvimentos obtidos nesse período influenciaram nas características atuais dos aerogeradores produzidos em larga escala com potência superior a 1MW. As empresas que foram pioneiras em pesquisas e desenvolvimento de aerogeradores, na década de 70, formam uma parcela significativa da cadeia de indústrias de aerogeradores que dominam atualmente o mercado de energia eólica em escala global. Na Tabela (2), podem ser observados os principais protótipos não comerciais de aerogeradores desenvolvidos no século XX e suas principais características.

Tabela 2: Protótipo de aerogeradores desenvolvidos no século XX (Dellezzopolles, 2011).

Aerogerador	País	Diâmetro da Turbina	Velocidade (rpm)	Número de pás	Potencia (KW)	Período
GEDSER	Dinamarca	24	30	3	200	1957-1967
NASA/DOE MOD-0	EUA	38,1	40	2	100	1974-1988
NASA/DOE MOD-0A	EUA	38,1	-	2	200	1977-1979
NIBE A	Dinamarca	40	34	3	630	1979
NASA/DOE MOD-1	EUA	61	-	2	2000	1979-1981
Maglarp	Suécia	78	25	2	3000	1981-1992
NÄSUDDEN	Suécia	75	25	2	2000	1982
NASA /DOE WTS-4	EUA	78,2	-	2	4000	1982-1994
ELSAM	Dinamarca	61	-	3	2000	1989-2001
Aeolus II	Alemanha	75	-	2	3000	1992
NÄSUDDEN II	Suécia	80	14/21	2	3000	1993

Na Tabela (2), nota-se que os protótipos de aerogeradores aumentaram continuamente a sua potência no decorrer dos anos e por extensão o diâmetro da turbina. Um protótipo de aerogerador, como o dinamarquês GEDSER da década de 60, possuía uma potência média de 200 KW e um diâmetro de 24 metros. Já um aerogerador típico da década de 90, como o sueco NÄSUDDEN II, possuía uma potência de 3000 KW e um diâmetro da turbina de 80 metros sustentada por uma torre de concreto de 78 metros de altura. No decorrer dos últimos anos, a potência media alcançada pelas turbinas eólicas continuou a aumentar, assim como o diâmetro médio das turbinas. Em meados de 2008, a potência media alcançada pelas turbinas eólicas disponíveis no mercado variava entre 3 MW e 5 MW, como o aerogerador finlandês REPOSSAREN que alcançava uma potência de até 3 MW. A Figura (3) ilustra respectivamente os aerogeradores GEDSER, NÄSUDDEN II e REPOSSAREN.



Figura 3: Aerogerador GEDSER (Museu da Eletricidade da Dinamarca, 1959) e aerogerador NÄSUDDEN II (Gunnar Britse, 1993) e aerogerador finlandês REPOSSAREN (Turku Energia, 2009)

Os protótipos de aerogeradores como o GEDSER e NÄSUDDEN II figuram como verdadeiras bancadas de simulações e ensaios (Dellezopolles, 2011). Esses protótipos permitem analisar e aperfeiçoar diversos componentes dos aerogeradores como a turbina, rotor, nacele e torre. Nesses dispositivos são realizadas diversas análises, como análises estáticas ou dinâmicas baseadas na resposta aerodinâmica desses dispositivos (Hansen et al, 2006).



Figura 4: Protótipo de aerogerador ST10 (Sway Turbines, 2012)

Entre os protótipos de aerogeradores mais modernos, encontra-se o protótipo de aerogerador ST10 desenvolvido pela companhia norueguesa Sway Turbine[®], esse protótipo de aerogerador alcança uma potência de 10 MW e foi desenvolvido para operar em alto-mar, conhecido como operação offshore, esse aerogerador possui 164 metros de diâmetro de rotor e apresenta um design diferenciado que permite uma redução significativa do seu peso e consequentemente do seu custo (Sway Turbines, 2012). A Figura (4) ilustra o aerogerador ST10 da Sway Turbine[®]. A potência alcançada por esse aerogerador é quase o dobro da potência atingida por um aerogerador moderno disponível no mercado.

2.2 DESCRIÇÃO DOS AEROGERADORES

Os aerogeradores são os dispositivos destinados a converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. A energia eólica é produzida pelo fluxo de ar na atmosfera, por um processo no qual a energia cinética dos ventos é convertida em trabalho de eixo, que por sua vez é transformado em energia elétrica no gerador do aerogerador. Os principais componentes de um aerogerador são a turbina, a torre de sustentação e a nacele onde estão localizados o

gerador e os sistemas de controle. A Figura (5) ilustra os principais subsistemas de um aerogerador de eixo horizontal.

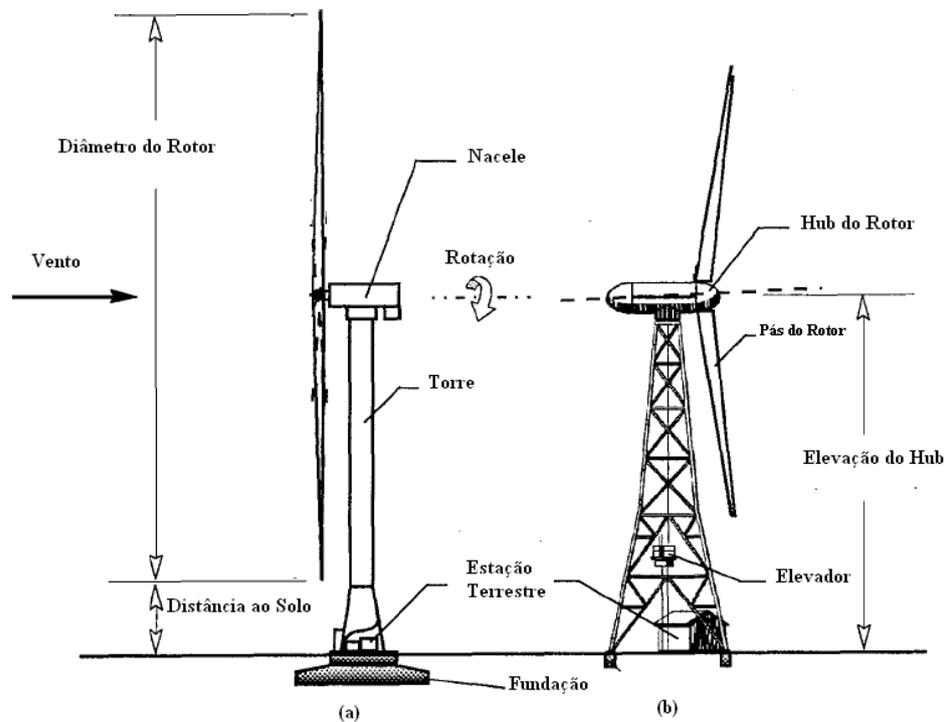


Figura 5: Principais subsistemas de um aerogerador de eixo horizontal (Spera, 2009).

Os aerogeradores podem ser classificados conforme a disposição do eixo da turbina, no qual ocorre o movimento mecânico provocado pelo vento ou pela maneira como as pás do aerogerador interagem com o vento (Ackerman, 2002; Dellezzopolles, 2011). No primeiro caso, considerando a disposição do eixo da turbina, as mesmas podem ser classificadas em turbinas de eixo horizontal, *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)* ou turbinas de eixo vertical, *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*. Na Figura (6) podem ser observados alguns exemplos de turbinas de eixo vertical como a H – Darrieus, Darrieus Giromill e a Savonius.



Figura 6: Aerogeradores, H-Darrieus, Darrieus Giromill e Savonius respectivamente (evoluçãoalp, 2013).

As turbinas de eixo vertical apresentam a vantagem de estarem geralmente localizadas próximas ao chão, fator que facilita a manutenção e operação da turbina. Outra vantagem da turbina de eixo vertical é a não necessidade de mecanismos que acompanhe a variação do vento, visto que as pás dessas turbinas conseguem captar a variação da direção do vento.

Entretanto, como desvantagem as VAWT possuem limitações quanto ao seu uso em projetos de elevado porte, pois estas turbinas estão localizadas em baixas altitudes, onde a velocidade do vento é menor e afeta a potência da turbina, que é diretamente proporcional à velocidade do vento. Outra desvantagem das VAWT é o tamanho limitado do aerogerador, devido ao momento que pode ser gerado na base que serve de suporte para a turbina de eixo vertical (Custódio, 2009).

As turbinas do tipo HAWT são as turbinas que dominam o mercado de geração de energia eólica, visto que, essas turbinas apresentam um maior aproveitamento da energia presente no vento (Dellezopolles, 2011). As turbinas de eixo horizontal HAWT podem apresentar diferentes números de pás, dependendo do propósito da turbina. Turbinas com duas ou três pás são geralmente utilizadas para geração de energia elétrica (Ackerman, 2002). Enquanto as turbinas do tipo HAWT que apresentam um maior número de pás são utilizadas para o bombeamento de água, pois quanto maior o número de pás, menor será a velocidade de rotação do rotor e maior o torque sobre o eixo do mesmo, fazendo com que os dispositivos que apresentam um maior número de pás sejam eficientes no bombeamento de água (Ackerman, 2002; Dellezopolles, 2011). Na Figura (7) podem ser observados dispositivos de eixo horizontal com elevado número de pás, utilizados para bombear água nos Estados Unidos da América.



Figura 7: Dispositivo de eixo horizontal utilizada nos Estados Unidos para bombear água (Spera, 2009)

As turbinas de eixo horizontal HAWT que apresentam rotores com três hélices emitem menos ruídos sonoros do que as turbinas que apresentam rotores com apenas duas hélices, visto que, as turbinas com rotores de três hélices atingem menor velocidade de rotação e conseqüentemente emitem menos ruído sonoro, constituindo uma característica importante quando estas turbinas são instaladas em regiões urbanas (Dellezopolles, 2011).

2.3 TORRES DE SUSTENTAÇÃO DE AEROGERADORES HAWT

A torre de sustentação de um aerogerador de eixo horizontal é um componente essencial na montagem de um aerogerador e representam aproximadamente 30% do custo total da instalação de um aerogerador onshore (Quilligan et al, 2012).

As torres de sustentação dos aerogeradores são as estruturas montadas flexíveis que sustentam o peso do rotor, das pás e dos sistemas mecânicos e elétricos presentes na nacelle. A torre de sustentação ainda é a estrutura responsável por transmitir os efeitos gravitacionais e carregamentos para a fundação do aerogerador (Wei Tong, 2010). A principal função da torre de sustentação é elevar o rotor de uma turbina de eixo horizontal HAWT, e assim permitir que as pás do aerogerador girem a uma altura adequada em relação ao solo (Paula, 2012).

Essas torres apresentam três geometrias predominantes: tubular cilíndrica, tubular cônica com diâmetro variável e as torres treliçadas. Quanto ao material utilizado na fabricação

das torres, elas podem ser fabricadas tradicionalmente em concreto ou aço. Todavia, no ano de 2011 a empresa Enercom instalou na Irlanda um aerogerador que utilizava uma torre de sustentação híbrida feita em concreto pré-estressado e aço tubular (Quilligan et al, 2012).

No Brasil, as torres de aço tubulares e tubulares cônicas dominam o mercado de geração de energia eólica do país. A Figura (8) ilustra respectivamente um aerogerador sustentado por uma torre de aço tubular cônica com diâmetro variável e um aerogerador sustentado por uma torre treliçada.

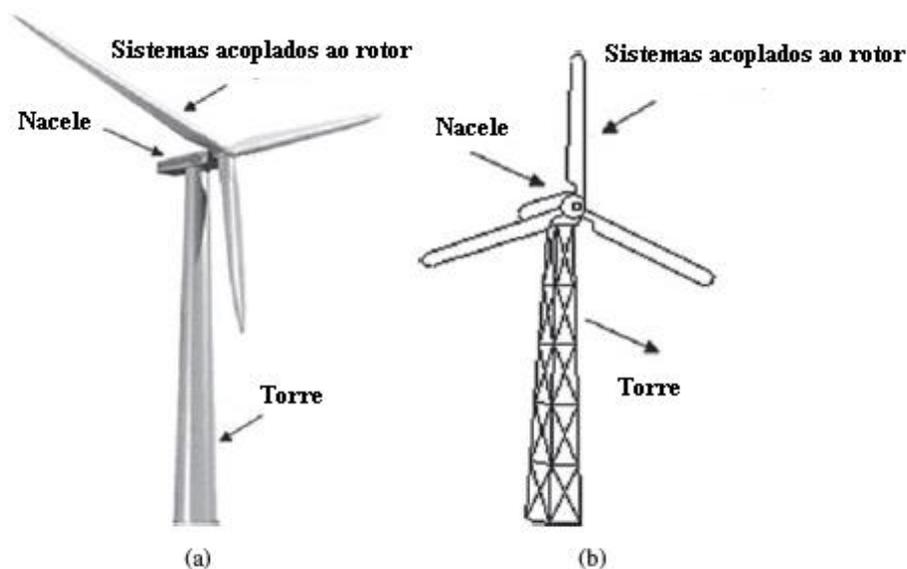


Figura 8: (a) Aerogerador com torre tubular cônica; (b) Aerogerador com torre treliçada (Wei Tong, 2010).

As torres treliçadas podem ser fabricadas por peças de perfil soldados e podem apresentar até metade do peso de uma torre eólica tubular segmentada, e são de fácil montagem. Entre as principais desvantagens desse tipo de torre estão a poluição visual provocado no meio onde estão inseridas e a dificuldade de manutenção devido a quantidade de barras existentes, limitando assim o seu uso em grande escala (Feijó, 2010).

As torres estaiadas são utilizadas em aerogeradores de pequeno porte. Nestas torres uma viga de aço está vinculada na base e se mantém na vertical com o auxílio de cabos de estaiio geralmente de aço fixados no topo e distribuídos até as fundações, garantindo assim a estabilidade da estrutura em todas as direções. Normalmente estas torres têm baixo custo de fabricação e instalação. Entre as principais desvantagens dessas torres estão dificuldades relativas ao acesso ao aerogerador para manutenção, e a necessidade de uma grande área livre para a fixação dos cabos no solo. A Figura (9) abaixo ilustra uma torre eólica estaiada.



Figura 9: Torre Eólica Estaiada (Lunar, 2015)

A altura de uma torre de sustentação de aerogerador varia entre 1 e 1,5 vezes o diâmetro do rotor (Wei Tong, 2010). Em 2012, a maior torre de sustentação de aerogerador onshore do mercado de geração de energia eólica mundial era a do aerogerador E-126, pertencente à empresa alemã Enercom, e possuía o *hub* do rotor posicionado a 135 metros do chão e produzia uma potência de 7,5MW (Quilligan et al, 2012). As torres estão a uma elevada altitude, visto que, a velocidade do vento aumenta com a altitude e torna-se menos turbulento, resultando em um maior aproveitamento da energia do vento (Wei Tong, 2010).

A seleção de uma torre para um determinado local depende das características do vento e do solo da região escolhida para instalação do aerogerador, visto que o posicionamento da torre para um melhor aproveitamento do vento é dependente destas características locais.

Entre outros fatores que influenciam no design e seleção de uma torre de sustentação para aerogerador destaca-se a maneira como a torre será erguida e as dimensões do guindaste para erguer a torre, aspectos referentes a ruído sonoro, estética e geometria da torre, assim como os impactos ambientais que a torre possa causar ao fluxo aviário na região onde será instalada (Wei Tong, 2010).

As torres de sustentação de aerogeradores geralmente são fabricadas em três partes ou seções que variam de 20 a 30 metros de comprimento. Esta limitação do comprimento se dá

devido a dificuldades de transporte do local de fabricação das torres até o local onde serão instaladas (Feijó, 2010). Assim sendo, as 3 seções a serem montadas no local de instalação do aerogerador facilitam o transporte da torre até o local de montagem do aerogerador. Um sistema de ligação com parafusos ou soldagem normalmente é utilizado para conectar as seções da torre no momento da montagem. A Figura (10) mostra as fases da montagem de um aerogerador implantado em 2011 no Parque Eólico Morro dos Ventos no Rio Grande do Norte pela General Eletrics GE, em parceria com a Tecsis ®.

Sequência de Montagem de um Aerogerador



Figura 10: Fases da montagem de um aerogerador (General Eletrics, 2015)

No projeto de uma torre de sustentação de aerogerador, a rigidez da estrutura é um dos principais fatores na análise do comportamento dinâmico do sistema torre – nacelle – pás, pois a rigidez da torre afeta significativamente a obtenção da frequência natural do aerogerador. No âmbito da dinâmica estrutural, uma torre rígida, no qual a frequência natural fundamental é maior do que a frequência das hélices do rotor girando, é preferível. Pois esta torre apresentará a vantagem de ser pouco afetada pelo movimento rotacional das hélices do rotor, entretanto, o custo relacionado ao aumento da massa e da quantidade de material utilizado no projeto para fabricar esse tipo de torre torna a utilização de uma torre com características inviáveis (Wei Tong, 2010).

Uma torre eólica flexível é uma torre no qual a frequência natural da torre é maior do que a frequência natural do rotor e menor do que a frequência das hélices do rotor girante (Wei Tong, 2010). As torres flexíveis são normalmente menos caras do que as torres rígidas, uma vez que, elas possuem menos massa e exigem menos materiais em sua fabricação. Entretanto, considerações em relação aos efeitos dinâmicos em que as torres estão submetidas precisam ser analisadas, visto que, essas torres normalmente estão expostas distribuições complexas de carregamentos aerodinâmicos (Hansen et al, 2006; Dellezopolles, 2011).

Devido a notória importância das torres de sustentação de aerogeradores como elemento estrutural e sua representação em termos de custos no aerogerador, no presente trabalho busca-se aplicar o controle estrutural de um aerogerador e observar a influência deste elemento, na busca de um projeto ótimo que tem como objetivo reduzir o peso da torre e indiretamente reduzir os custos com materiais. Como a abordagem de otimização e controle em um único trabalho ainda são escassos na literatura, a revisão bibliográfica que se segue apresentará trabalhos relativos ao controle estrutural e otimização estrutural em dois tópicos separados.

2.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE TORRES DE AEROGERADORES

Considerando a importância das torres de sustentação de aerogeradores anteriormente mencionada, estas estruturas necessitam ter o seu comportamento estrutural analisado, de forma a garantir projetos estruturalmente seguros e com custos de fabricação cada vez menores (Santos, 2013). Nesse sentido, a seguir são apresentados alguns trabalhos relevantes em otimização estrutural de torres de sustentação de aerogeradores.

Negm e Maalawi (2000) desenvolveram modelos de otimização estrutural de uma torre de aço constituída por segmentos tubulares, engastada na base e com uma massa concentrada no topo para representar a nacelle e o rotor. Neste trabalho, os autores utilizaram 4 funções objetivo: a diminuição da massa, maximização da rigidez; da relação entre a rigidez e a massa; além da minimização dos efeitos das vibrações. As variáveis de projeto adotadas pelos autores foram a área de seção transversal, o raio de giração e comprimento de cada segmento da torre. As restrições impostas pelos autores incluíam limitações da tensão máxima e deflexão, somadas a restrições laterais do diâmetro médio dos segmentos e da espessura das paredes.

Uys et al (2007) realizaram a otimização estrutural de uma torre de aço cônica de 45 m de altura, dividida em três segmentos com anéis enrijecedores. A função objetivo do trabalho era minimizar a função custo, construída a partir dos custos com materiais, anéis enrijecedores

e processo de fabricação. As variáveis de projeto foram as espessuras das chapas e a quantidade e dimensão dos anéis enrijecedores. Foram impostas restrições relativas a flambagem local e global de acordo com as recomendações da fundação norueguesa Det Norske Veritas (DNV) e do American Petroleum Institute (API). O problema de otimização foi resolvido por meio do algoritmo de Rosenbrock. Neste trabalho, os autores concluíram que a quantidade e a dimensão dos enrijecedores tem efeito direto na função custo, quanto maior a quantidade de enrijecedores maior será o custo total da torre.

Silva et al (2008) formularam a otimização estrutural de torres de sustentação de aerogeradores de concreto reforçado. Os objetivos da formulação eram encontrar o ótimo custo, tempo computacional, técnica de construção e precisão estrutural dos modelos. As variáveis de projeto eram as propriedades geométricas e área do aço reforçado de elementos estruturais. Restrições em relação à tensão, deslocamento e frequência natural foram aplicadas na busca de um projeto ótimo utilizando o método Lagrangiano para problemas de dinâmica estrutural.

Feijó (2010) desenvolveu o projeto de otimização estrutural de duas torres de aço formada por segmentos tubulares no formato de tronco e cilíndrico para sustentação de aerogeradores. A função objetivo buscada no projeto era o custo com materiais na construção da torre, tratada por meio da minimização do seu peso. As variáveis de projeto foram os diâmetros médios dos segmentos e a espessura da casca desses segmentos. As restrições de projeto incluíam aspectos relativos à rigidez, resistência e estabilidade de acordo com as normas brasileiras, assim como restrições relativas a frequência natural, geometria e transporte, somadas a essas restrições, foram incluídas restrições ao deslocamento máximo horizontal no topo da torre. Os problemas de otimização foram resolvidos por meio de algoritmos genéticos no ambiente computacional MATLAB. Os resultados alcançados foram comparados com resultados da literatura e as soluções obtidas foram analisadas utilizando elementos de cascas do programa ABAQUS.

Lima (2011) formulou um modelo de otimização de torres eólicas tubulares de aço compostas de segmentos em tronco de cone com o objetivo de minimizar o peso da torre. A concepção de análise adota modelo de viga engastada livre conduzida por uma análise geométrica não linear pelo Método dos Elementos Finitos. Neste trabalho o conjunto composto pela nacelle e rotor foi modelado como uma massa rígida fixada no topo da torre, sem rotação. O carregamento atuante na estrutura inclui o peso próprio da torre e da massa concentrada no topo representando a nacelle e o rotor, assim como a ação do vento na torre e nas pás, modelado de acordo com a norma brasileira ABNT-NBR 6123. Como variáveis de projeto foram

utilizados os diâmetros externos e as espessuras de casca de cada segmento da torre, tratadas como variáveis discretas. As restrições de projeto incluem resistência a estabilidade e rigidez, deslocamento no topo, além de restrições relativas à frequência natural fundamental e geometria. O modelo de otimização foi implementado utilizando o ambiente computacional MATLAB por meio da utilização de um algoritmo genético. As soluções obtidas são analisadas utilizando elementos de casca do programa ABAQUS.

Santos (2013) desenvolveu um projeto de otimização estrutural de dois modelos de torre eólica utilizando o pacote computacional ANSYS com o objetivo de diminuir o volume da torre. As torres foram modeladas no ANSYS como elemento de casca utilizando o elemento SHELL181. Neste trabalho, a autora utilizou como variável de projeto a espessura da casca da torre. As restrições de projeto estavam vinculadas a frequência natural, tensão de von mises e deslocamento máximo. A modelagem do carregamento incluía o peso da própria torre e o peso da nacela. O carregamento incluía ainda o efeito estático da ação do vento sobre a torre por meio de um carregamento trapezoidal. No primeiro modelo analisado pela autora foram impostas restrições à resposta estática da estrutura e o algoritmo de otimização foi o de primeira ordem, disponível no ANSYS. No segundo modelo analisado, foram impostas restrições relativas às frequências naturais e o algoritmo de otimização foi o de zero ordem, também disponível no ANSYS. No processo de otimização estrutural, a autora obteve uma redução de aproximadamente 40% do volume das torres analisadas.

Perelmuter et al (2013) estudaram a otimização de uma torre eólica composta por segmentos cônicos cujos os diâmetros variavam linearmente ao longo do comprimento da torre. A função objetivo buscada pelos autores era a redução do peso da torre. As variáveis de projeto utilizadas pelos autores foram a altura da torre, os diâmetros da superfície da torre e a espessura. O carregamento de vento foi considerado como uma função de estado. O problema de otimização paramétrica foi solucionado com o método dos gradientes melhorados por meio do software OptCAD. Os resultados alcançados foram comparados com outros resultados da literatura.

2.4 CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM AEROGERADORES

À medida que as torres de sustentação de aerogeradores se tornam mais esbeltas e flexíveis, e cada vez mais apresentam rotores com diâmetros maiores e operam em ambientes mais severos, como os aerogeradores em ambientes offshore, que estão sujeitos não apenas as excitações randômicas de cargas de vento, mas também excitações provenientes da interação fluido-estrutura, provocado pelas ondas do mar, o controle de vibrações nessas torres torna-se

cada vez mais importante para mitigar as vibrações excessivas e indesejáveis nessas estruturas. A Figura (11) ilustra uma torre de sustentação de aerogerador onshore que entrou em colapso nos Estados Unidos no ano de 2007.



Figura 11: Torre de sustentação de aerogerador em colapso nos Estados Unidos da América (Katu, 2013)

A tendência de construir torres de aerogeradores cada vez mais altas e esbeltas e, portanto, mais flexíveis é resultado do crescente progresso das técnicas de análise e dimensionamento de estruturas, assim como os constantes avanços na área engenharia de materiais e das técnicas de fabricação e construção. Esses progressos foram obtidos devido à necessidade de conciliar uma maior potência gerada pelos aerogeradores, a uma elevada altitude, e a necessidade de manter as condições de operacionalidade desses dispositivos.

Estudos indicam que a aceleração induzida pelo vento nos aerogeradores pode ser a razão da curta operação de determinados aerogeradores e razão de falhas em componentes e subcomponentes sensíveis a aceleração em aerogeradores (Dueñas et al., 2008). Neste contexto, estratégias de controle estrutural para estruturas como torres de sustentação de aerogeradores que estão suscetíveis a vibrações provocadas pelo vento tem se tornado cada vez mais importante para mitigar vibrações indesejáveis no aerogerador.

Entre os inúmeros sistemas e dispositivos de controle de vibrações existentes, os amortecedores de massa sintonizada como dispositivos de controle passivo têm se tornado popular, devido à simplicidade de projeto e execução desses dispositivos, somado a eficiência dos mesmos em determinadas frequências de interesse (Wei Tong, 2010). Uma quantidade considerável de pesquisas e trabalhos estão disponíveis na literatura referentes ao controle de

vibrações em estruturas esbeltas e flexíveis. Uma breve referência às pesquisas e estudos desenvolvidos no controle de vibrações em aerogeradores será apresentada a seguir, assim como estudos considerados relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Yalla et al. (2001) investigaram o controle de vibrações em estruturas utilizando amortecedores de coluna líquida sintonizados semiativos, a estrutura estudada foi modelada como um sistema de múltiplos graus de liberdade e submetidas a carregamentos harmônicos e cargas de vento randômicas. Foi obtida uma expressiva redução do deslocamento e aceleração, dos exemplos numéricos modelados pelos autores.

Gerges et al. (2003) realizou um estudo do comportamento de uma torre esbelta mediante a utilização de amortecedores de massa sintonizada não lineares em ensaios de túnel de vento. Os amortecedores de massa sintonizada foram utilizados com o objetivo de reduzir as oscilações que o vento provoca na estrutura da torre.

Murtagh et al. (2007) estudaram o controle de vibrações em um aerogerador incluindo a interação entre a torre e as hélices do aerogerador utilizando amortecedor de massa sintonizado passivo. O deslocamento total do aerogerador tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência, utilizando o AMS foi significativamente reduzido quando comparado ao deslocamento total do aerogerador submetido a cargas de vento randômicas sem o AMS.

Basu et al. (2009) estudaram o controle estrutural de aerogeradores offshore modelado como um corpo de múltiplos graus de liberdade, utilizando amortecedores de coluna líquida sintonizado para diminuir as vibrações indesejáveis provocadas por carregamentos aerodinâmicos e vibrações provocadas pela interação das ondas do mar no aerogerador. Foi obtida uma significativa redução da resposta total e do momento de flexão na base do aerogerador, mediante médias e fortes excitações que simulam cargas de vento e de ondas do mar, utilizando o dispositivo de controle estrutural propostos pelo autor.

Karimi et al. (2010) estudaram o controle de vibrações em uma torre de sustentação de aerogerador offshore utilizando um amortecedor semiativo de coluna líquida com válvula controlável e sistema de realimentação. Mediante a aplicação do dispositivo de controle estrutural proposto pelo autor, foi obtida uma significativa redução do deslocamento da extremidade superior da torre, quando esta foi submetida a excitações dinâmicas.

Lackner et al. (2010) investigaram o controle estrutural de um aerogeradores offshore utilizando amortecedores de massa sintonizado passivos. Neste trabalho, dois AMS's foram

incorporados a nacele do modelo de aerogerador proposto pelos autores e foi realizado um estudo paramétrico para verificar quais seriam os parâmetros ótimos para utilização dos AMS's passivos no aerogerador offshore.

Tsouroukdissian et al.(2011) estudaram o controle de vibrações e a redução de carregamentos em um aerogerador Alstom ECO100 3MW utilizando amortecedores de fluido viscoso passivos e semiativos e investigaram a sensibilidade do posicionamento desses amortecedores para determinar o posicionamento ótimo e a melhor configuração cinemática desses dispositivos de controle estrutural. Os estudos foram conduzidos em um aerogerador real e foi utilizado o software ANSYS, como ferramenta computacional. Obteve-se uma redução de cerca de 20 % nos carregamentos submetidos ao aerogerador para determinadas configurações e posicionamentos dos amortecedores de fluido viscoso e percebeu-se ainda que o posicionamento ótimo do sistema de controle foi na base do aerogerador estudado.

Laks et al. (2010) apresentam um panorama das estratégias e técnicas de controle tradicionais de aerogeradores de eixo horizontal e as técnicas de controle de aerogeradores desenvolvidas recentemente. Roffel et al,(2012) estudaram a performance de um amortecedor de massa sintonizada na forma de pêndulo para redução da resposta de estruturas flexíveis. Neste trabalho a sensibilidade para a obtenção dos parâmetros ótimos do pêndulo foram investigados.

Stewart (2012) estudou a redução de carregamentos em aerogeradores offshore mediante a utilização de amortecedores de massa sintonizada como dispositivos de controle estrutural. Neste trabalho, foram estudados os parâmetros ótimos de amortecedores de massa sintonizada passivos acoplados em aerogeradores offshore.

Fitzgerald et al. (2013) investigaram o uso de amortecedores de massa sintonizada para realizar o controle de vibrações nas hélices de um rotor de aerogerador em movimento. Nesse sentido, os autores realizaram a modelagem de três aerogeradores utilizando amortecedores ativos, passivos e modelagens com o aerogerador sem dispositivo de controle. Esses modelos foram desenvolvidos utilizando a formulação de Euler-Lagrange e carregamentos de vento foram aplicados aos modelos. Como resultado verificou-se que a redução de vibrações nas hélices do rotor foi maior mediante a utilização dos amortecedores ativos.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA

O presente capítulo tem por objetivo apresentar a formulação matemática relacionada ao comportamento dinâmico do aerogerador.

Em sistemas com múltiplos graus de liberdade, como o aerogerador estudado, a resposta da estrutura pode ser obtida por meio de um modelo reduzido por intermédio da análise modal (Soong e Dargush, 1997).

A equação de movimento para um sistema de vários graus de liberdade, como o aerogerador estudado, submetido a excitações dinâmicas pode ser expressa por:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K} \mathbf{Y} = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

Onde \mathbf{M} representa a matriz de massa do sistema principal, \mathbf{C} a matriz de amortecimento e \mathbf{K} a matriz de rigidez do sistema principal. O vetor $\mathbf{P}(t)$ representa o carregamento dinâmico externo aplicado à estrutura em um período de tempo t . Os vetores $\ddot{\mathbf{Y}}$, $\dot{\mathbf{Y}}$ e \mathbf{Y} representam a aceleração, velocidade e deslocamento do sistema principal, respectivamente.

Em termos matemáticos a equação (1), representa um sistema de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem. A resolução desse sistema de equações pode ser obtida por intermédio de duas técnicas de solução na análise dinâmica, a integração numérica e a superposição modal. As duas técnicas podem levar a resultados numéricos satisfatórios, diferindo apenas em termos do custo computacional dispendido para cada tipo de problema analisado (Avila, 1997).

3.1.1 Integração Numérica

O método da integração numérica busca resolver o sistema de equações apresentados na equação (1) no intervalo de tempo Δt analisado. Essencialmente esse método numérico busca garantir o equilíbrio entre os pontos discretos ao longo do intervalo total de solução. Admite-se que as velocidades, acelerações e deslocamentos iniciais, no tempo $t = 0$, sejam conhecidos e que a solução deve satisfazer a equação (1), no intervalo de tempo de 0 a t . Então, discretiza-se o intervalo total em n intervalos de tempo Δt iguais e o por meio de integrações, obtém-se uma solução aproximada para os instantes de tempo $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, t$. O valor recomendado do intervalo de tempo, para atingir resultados aceitáveis, é $\Delta t \leq \frac{T}{10}$, onde T é o menor período natural de vibração da estrutura (Avila, 1997). Existem inúmeras técnicas de

integração numérica, como o método da diferença central, o método de Houbolt, método θ de Wilson e o método de Newmark. Estudos referentes à estabilidade e precisão desses diversos métodos de integração numérica podem ser encontrados tanto em Bathe (1976), quanto em Menin et al (2007).

No presente trabalho será utilizado o método de Newmark, pois o pacote computacional ANSYS utilizado na modelagem e solução dos problemas propostos no presente trabalho, utiliza esse método de integração direta e implícita para obter a solução das equações de movimento do aerogerador proposto no trabalho.

3.1.2 Superposição Modal

Em muitas estruturas que apresentam o comportamento linear, o método da superposição modal tem sido utilizado tradicionalmente para obtenção da resposta dinâmica dessas estruturas. Ele consiste essencialmente em expressar o movimento da estrutura em termos dos modos normais de vibração, desmembrando o sistema apresentado na equação (1) em equações independentes. A resposta total então é obtida por meio da superposição total das soluções das equações modais independentes (Wilson, 1976).

Nesse método são utilizados os modos de vibração e as frequências naturais da estrutura para a transformação do sistema acoplado de equações diferenciais (1), em um sistema de equações diferenciais desacoplados, onde cada equação contém uma incógnita associada a um grau de liberdade (Wilson, 1976).

As frequências naturais de vibração ω_i e os modos de vibração correspondentes φ_i , para cada i -ésimo grau de liberdade da estrutura ($i = 1, 2, \dots, N$), podem ser obtidos por meio do problema de autovalores:

$$\mathbf{K} \varphi_i = \omega_i^2 \mathbf{M} \varphi_i \quad (2)$$

A Matriz no qual as colunas são as formas nodais φ_i é denominada matriz modal Φ , e apresenta propriedades de ortogonalidade em relação a matriz de massa e rigidez da estrutura. E os modos podem ser então normalizados, como por exemplo, em Wilson (1976), de modo que:

$$\bar{M} = \Phi^T M \Phi = \mathbf{I} \text{ e } \bar{K} = \Phi^T K \Phi \quad (3)$$

Na equação (3) \bar{M} é a matriz de massa generalizada, \mathbf{I} é a matriz identidade e \bar{K} a matriz de rigidez, que é uma matriz diagonal no qual os elementos da diagonal são as frequências naturais ao quadrado.

Por intermédio da matriz modal as coordenadas físicas \mathbf{Y} podem ser transformadas em coordenadas generalizadas por meio da equação:

$$\mathbf{Y} = \Phi \quad (4)$$

Assim, as equações de movimento em coordenadas modais podem ser expressas a partir da eq. (5), apresentada a seguir.

$$\bar{M} \ddot{\mathbf{Y}} + \bar{C} \dot{\mathbf{Y}} + \bar{K} \mathbf{Y} = \bar{\mathbf{P}} \quad (5)$$

Na equação (5), a matriz de amortecimento generalizada \bar{C} e o vetor carregamento dinâmico externo generalizado $\bar{\mathbf{P}}$, podem ser obtidos respectivamente por meio da eq. (6).

$$\bar{C} = \Phi^T C \Phi \quad \text{e} \quad \bar{\mathbf{P}} = \Phi^T P \quad (6)$$

A Superposição dos efeitos relativos a cada equação modal fornece a resposta da estrutura.

3.2 Solução Harmônica do Aerogerador.

Na Figura (12) pode ser observado o aerogerador modelado como um sistema de um grau de liberdade, correspondente ao modo a ser controlado (Soong e Dargush, 1997). Considerações referentes à modelagem do aerogerador como um sistema de um grau de liberdade (1.G.D.L) serão apresentadas no capítulo 5 do presente trabalho, onde são realizadas as considerações da modelagem numérica do aerogerador.

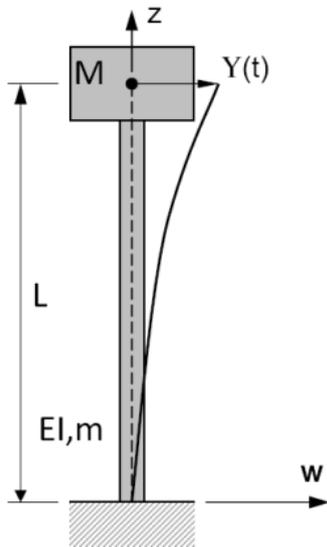


Figura 12: Aerogerador Modelado como um sistema de um grau de liberdade (Morais et al, 2009)

Na Figura (13) pode ser observado um diagrama de um amortecedor de massa sintonizada do tipo pêndulo, conectado a um sistema principal, que no caso em estudo representa o aerogerador que foi modelado como um sistema de (1.G.D.L). O sistema formado pelo pêndulo conectado ao aerogerador constitui um sistema de dois graus de liberdade (2.G.D.L).

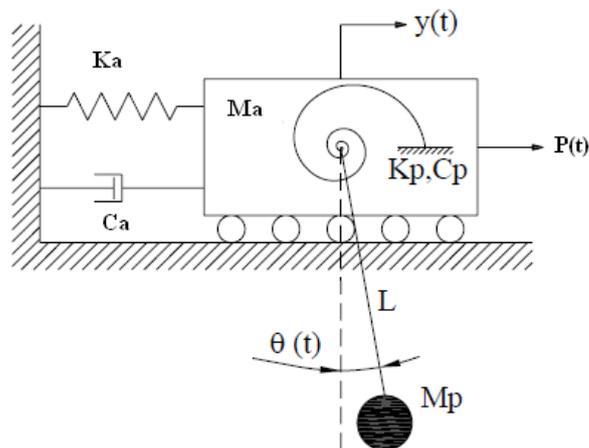


Figura 13: Modelagem do pêndulo linear conectado ao aerogerador submetido a um carregamento $P(t)$ (Zuluaga, 2007)

As equações de movimento do sistema pêndulo conectado ao aerogerador, considerando o deslocamento do pêndulo podem ser dadas por meio das equações (7) e (8), apresentadas a seguir:

$$(M_a + M_p) \ddot{Y} + M_p L \ddot{\theta} + C_a \dot{Y} + K_a Y = P(t) \quad (7)$$

$$M_p L \dot{Y} + M_p L^2 \ddot{\theta} + C_p \dot{\theta} + (K_p + M_p gL) \theta = 0 \quad (8)$$

Os símbolos utilizados nas equações (7) e (8) acima, são explicitados abaixo:

M_a : Massa modal do aerogerador.

C_a : Amortecimento modal do aerogerador.

K_a : Rigidez modal do aerogerador.

M_p : Massa do pêndulo

C_p : Amortecimento do pêndulo.

K_p : Rigidez do pêndulo.

L : Comprimento do cabo do pêndulo.

g : Aceleração gravitacional.

$\theta(t)$: Deslocamento angular do pêndulo.

$P(t)$: Excitação Modal externa.

$Y(t)$: Deslocamento do aerogerador

Chamando $P(t) = e^{i\omega t}$, $Y(t) = H_y(\omega) e^{i\omega t}$ e $\theta(t) = H_\theta(\omega) e^{i\omega t}$ e realizando substituições nas equações (7) e (8), tem-se:

$$[-(M_a + M_p)\omega^2 + C_a i\omega + K_a] H_y(\omega) - M_p L \omega^2 H_\theta(\omega) = 1 \quad (9)$$

$$M_p L \omega^2 H_y(\omega) + [-M_p L \omega^2 + C_p i\omega + (K_p + M_p gL)] H_\theta(\omega) = 0 \quad (10)$$

As equações (9) e (10) reescritas matricialmente geram o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{pmatrix} -(M_a + M_p)\omega^2 + C_a i\omega + K_a & -M_p L \omega^2 \\ -M_p L \omega^2 & -M_p L \omega^2 + C_p i\omega + (K_p + M_p gL) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_y(\omega) \\ H_\theta(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

A partir da resolução do sistema de equações lineares disposto na equação (11), obtêm-se as funções de resposta do aerogerador e do pêndulo no domínio da frequência. As expressões da função resposta no domínio da frequência quando a estrutura é submetida a uma força podem ser obtidas em Zuluaga (2007).

3.3 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

3.3.1 Introdução a Otimização Estrutural

Um das principais metas de um engenheiro é encontrar métodos que melhorem os processos de um projeto e auxiliem na obtenção de resultados mais eficientes. O resultado final de um projeto é obtido depois de avaliações que definem a viabilidade técnica, normativa e de execução, no qual várias variáveis podem ser alteradas em busca de um projeto satisfatório (Arora, 1997).

Essencialmente, a sistemática de um projeto estrutural tradicional consiste em um processo de tentativa e erro, cujos resultados e eficiência estão vinculados a experiência e intuição do projetista. Nesse sentido, a otimização estrutural por meio de técnicas matemáticas auxiliadas por ferramentas computacionais aparece como alternativa para buscar os melhores parâmetros de projeto e assim conduzir a uma solução que apresente resultados ótimos.

A otimização estrutural normalmente é dividida em três áreas: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica. Na otimização paramétrica, são otimizados os parâmetros da estrutura, sem a modificação da sua forma inicial. Na otimização de forma são modificadas as características da geometria inicial da estrutura, de modo a obter uma geometria ótima. A otimização topológica busca encontrar a distribuição ótima do material, originando assim uma nova topologia. No presente trabalho as variáveis de projeto são o raio externo e interno da torre e a sua espessura, tratando-se, portanto, de um projeto de otimização paramétrica.

3.3.2 Considerações Iniciais

Em um problema de otimização, busca-se maximizar ou minimizar uma função objetivo. A função objetivo é dependente das variáveis de projeto (DV-Design Variables) e estas variáveis podem sofrer alterações ao longo do processo de otimização. No processo de otimização, além da definição da função objetivo e das variáveis de projeto, ainda é necessário impor restrições para que o projeto possa atender especificações técnicas e ser viável. Estas

restrições podem estar relacionadas as propriedades do material da estrutura, limitações geométricas, requisitos de normatizações, leis físicas e outros fatores.

Os conceitos apresentados neste tópico podem ser encontrados com mais detalhes no trabalho de Arora (1997).

3.3.3 Função Objetivo

A função objetivo (Objective Function) quantifica o objetivo e, é utilizada como uma medida da eficiência do projeto, sendo função das variáveis do projeto (Santos, 2013). A função objetivo pode ser classificada em simples ou multiobjetivo. A função simples é aquela no qual tem-se apenas um objetivo e a função multiobjetivo é aquela no qual busca-se atender diversas funções objetivos simultaneamente (Silva, 2005).

3.3.4 Variáveis de Projeto

Em termos de otimização estrutural, as variáveis de projeto são os parâmetros que os projetistas podem modificar durante a concepção do projeto em busca de um resultado ótimo. Estas variáveis podem corresponder, por exemplo, a dimensões geométricas alteradas e variações de espessura ou variação de uma propriedade física como o módulo de elasticidade em problemas de otimização estrutural. A seleção adequada das variáveis de projeto é fundamental para os resultados do processo de otimização. É recomendado o uso do menor número possível de variáveis para descrever adequadamente a estrutura.

As variáveis de projeto são utilizadas para descrever as características do projeto e podem ser expressas vetorialmente, como na equação (14):

$$X = (X_1, X_2, X_3 \dots, X_n) \quad (14)$$

As variáveis de projeto podem ser classificadas em variáveis de projeto discretas e contínuas. As variáveis discretas estão limitadas a valores isolados, enquanto as variáveis de projeto contínuas podem assumir qualquer valor. Em geral, os processos de otimização estrutural que utilizam variáveis de projeto discretas apresentam maior complexidade de resolução do que os projetos que utilizam variáveis de projeto contínuas (Santos, 2013).

3.3.5 Restrições de Projeto

As restrições de projeto são limitações impostas ao problema e delimitam o espaço de busca da solução ótima a um dado intervalo especificado pelo projetista. Estas restrições podem ser utilizadas para restringir por exemplo, intervalo de variação das variáveis de projeto, assim como o intervalo de variação de propriedades mecânicas dos materiais utilizados no projeto. Normalmente as restrições atendem a especificações e normas técnicas, limitações geométricas ou particularidades do projeto.

As restrições podem ser classificadas em três tipos: restrições laterais, restrições de igualdade e restrições de desigualdade. As restrições laterais impõem limites superiores e inferiores aos valores das variáveis de projeto (Santos, 2013).

Considerando um grupo de variáveis de projeto, uma restrição lateral pode ser representada pela equação (15):

$$X_{min_i} \leq X_i \leq X_{max_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

Uma restrição de desigualdade pode ser representada por uma equação do tipo:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, n_g \quad (16)$$

A restrição de igualdade pode ser representada pela seguinte equação:

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, n_e \quad (17)$$

Silva (2005) afirma que as restrições de igualdade são em geral complexas de serem implementadas em alguns algoritmos não lineares de otimização e podem ser transformadas em equações do tipo:

$$h_k(x) \leq 0 \quad \text{ou} \quad h_k(x) \geq 0 \quad (18)$$

As restrições de igualdade ou desigualdade são em geral mais complexas de serem implementadas. Enquanto que, as restrições de igualdade são representadas em problemas de otimização pelas equações de equilíbrio que a estrutura deverá satisfazer em termos das variáveis de projeto. As restrições de desigualdade são utilizadas, por exemplo, para restringir a tensão ou deslocamento em cada ponto da estrutura (Santos, 2013).

Na medida do possível, um grande número de restrições devem ser evitadas em um projeto de otimização, pois quanto maior o número de restrições maior serão os custos computacionais no processo de otimização.

3.3.6 Formulação do Problema de Otimização

Um problema de otimização estrutural sujeito a restrições impostas pode ser representado matematicamente pelas seguintes equações:

Minimizar:

$$f(x) \tag{19}$$

Sujeito a:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, n_g \tag{20}$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, n_e \tag{21}$$

Nas equações apresentadas acima, $f(x)$ representa a função a ser maximizada ou minimizada e x indica o vetor das variáveis de projeto. As funções $g_j(x)$ e $h_k(x)$ são as funções que possuem as restrições de igualdade e desigualdades impostas ao problema de otimização pelo projetista.

O fato de representar matematicamente o problema de otimização nas equações (19), (20), (21) como uma minimização ao invés de uma maximização é apenas uma questão de notação e não altera os conceitos apresentados.

Um problema de otimização é classificado como linear se a função objetivo e as restrições impostas ao problema forem lineares, isto é:

Minimizar:

$$f(x) = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \tag{22}$$

De modo que:

$$h_k(x) = B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n = 0 \quad j = 1, \dots, n_e \tag{23}$$

$$g_j(x) = D_1X_1 + D_2X_2 + \dots + D_nX_n \geq 0 \quad j = 1, \dots, n_g \tag{24}$$

Caso as equações acima apresentadas não sejam satisfeitas, o problema de otimização será não linear. Se o problema de otimização for linear, poderá ser resolvido por meio de técnicas de programação linear.

3.3.7 Projetos Viáveis e Inviáveis

Modelado o problema de otimização, é necessário verificar a região onde estará localizada a sua solução. A região do domínio no qual as restrições são respeitadas é denominada domínio viável, por outro lado, a região do domínio no qual uma restrição é violada é denominada domínio do inviável (Silva, 2005). A Figura (14) ilustra esse conceito para um espaço bidimensional no qual cada eixo coordenado representa uma variável de projeto X_i .

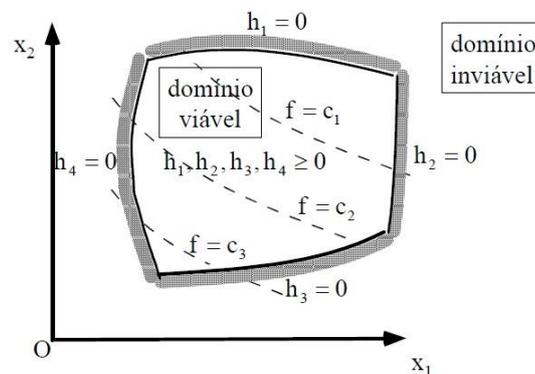


Figura 14: Regiões de domínio viável e inviável (Silva, 2005)

A partir do gráfico bidimensional da Figura (14), é possível compreender a influência das restrições na localização da solução ótima. Qualquer ponto no espaço é candidato a solução. Na grande maioria dos problemas de otimização, o mínimo da função é encontrado no limite entre os dois domínios, viável e inviável. No domínio viável todas as restrições são satisfeitas e pelo menos uma das restrições está ativa, enquanto no domínio inviável pelo menos uma das restrições é violada (Santos, 2013).

A Figura (15) ilustra as curvas de nível de uma função $f(x)$ a ser minimizada. Em consequência das funções de restrição impostas ao problema de otimização, surgem os conceitos de mínimo local e global. Silva (2005) afirma que o mínimo local aparece em uma cavidade “secundária” e que em geral os problemas de otimização possuem muitos mínimos locais e muitas vezes os algoritmos estacionam nestes mínimos locais.

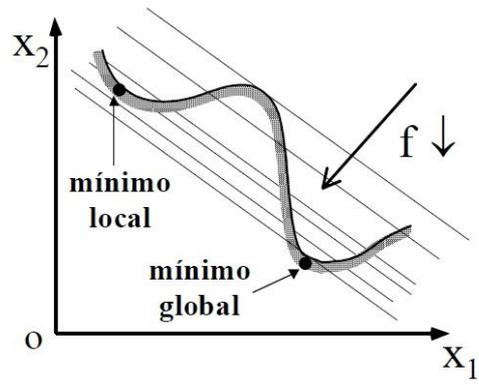


Figura 15: Conceitos de mínimo local e mínimo global (Silva, 2005)

4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente trabalho foi utilizado um pacote computacional para conduzir as análises estruturais do aerogerador. O pacote computacional utilizado foi o ANSYS R13.0, que foi utilizado para realizar análises estáticas, modais, transientes, além de otimizações estruturais da torre de sustentação do aerogerador modelado como elemento de viga.

4.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para conduzir as análises da estrutura da torre de sustentação do aerogerador, conforme mencionado anteriormente, o pacote computacional ANSYS R13.0 (2012) foi utilizado como ferramenta computacional, esse *software* apresenta inúmeras plataformas de simulações em um ambiente denominado *Multiphysics*. Entre as inúmeras funções que o software apresenta, é possível modelar a estrutura em elementos finitos e realizar análises conforme o interesse do usuário.

O ANSYS é um pacote computacional utilizado na modelagem via método elementos finitos (MEF) de uma abrangente variedade de problemas de engenharia como: a análise estrutural estática e dinâmica, mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa, assim como problemas de vibroacústica e eletromagnetismo e solução de problemas em outras áreas da engenharia.

O processamento de uma modelagem estrutural via elementos finitos no ANSYS normalmente é dividido em três etapas, dispostas a seguir:

- i. **Pré-processamento:** Etapa no qual ocorre a definição do problema, inserção das características geométricas e físicas do modelo, assim como das propriedades do material utilizado na modelagem. A definição do tipo de análise, a discretização da estrutura e a geração de malhas ocorrem nessa etapa.
- ii. **Processamento:** Nesta etapa ocorrem as definições e aplicações de carregamento na estrutura em análise, assim como a aplicação de restrições aos movimentos rotacionais e translacionais da estrutura. É por fim, é realizado o processamento da solução do sistema de equações resultantes da modelagem da estrutura.

- iii. **Pós-processamento:** Etapa final do processamento da modelagem da estrutura e análise estrutural, onde são obtidos os resultados conforme o tipo de análise imposta no pré-processamento.

4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Na modelagem da torre de sustentação do aerogerador, buscou-se utilizar os elementos que simulassem mais adequadamente o comportamento da torre e suas condições de apoio.

A seguir são apresentados os elementos utilizados nas análises deste trabalho e uma descrição de suas características e capacidades.

4.3.1 BEAM188

A Figura (16) ilustra o elemento BEAM188 e as suas características principais são apresentadas a seguir:

- Pode apresentar dois nós (I e J) ou três nós (I, J e K).
- Apresenta seis graus de liberdade em cada um dos seus nós, translações nas direções X, Y e Z e rotações em torno das mesmas direções.
- Trata-se de um elemento adequado para aplicações lineares que exigem elevadas rotações e elevadas tensões em aplicações não lineares.
- Adequado para realizar análises de estruturas na forma de vigas esbeltas e moderadamente finas.
- Elemento baseado na teoria de viga de Timoshenko.

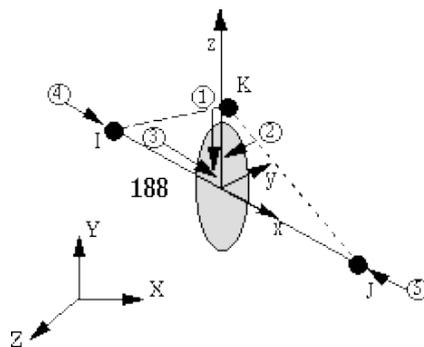


Figura 16: Elemento BEAM 188 (ANSYS, 2012)

4.3.2 BEAM4

A Figura (17) ilustra o elemento BEAM4 e as suas características principais são apresentadas a seguir:

- Pode apresentar dois nós (I e J) ou três nós (I, J e K).
- Apresenta seis graus de liberdade em cada um dos seus nós, translações nas direções X, Y e Z e rotações em torno das mesmas direções.
- É um elemento uniaxial que permite modelagens de tração, torção, compressão e dobramento.
- Baseado na teoria de Bernoulli- Euler.

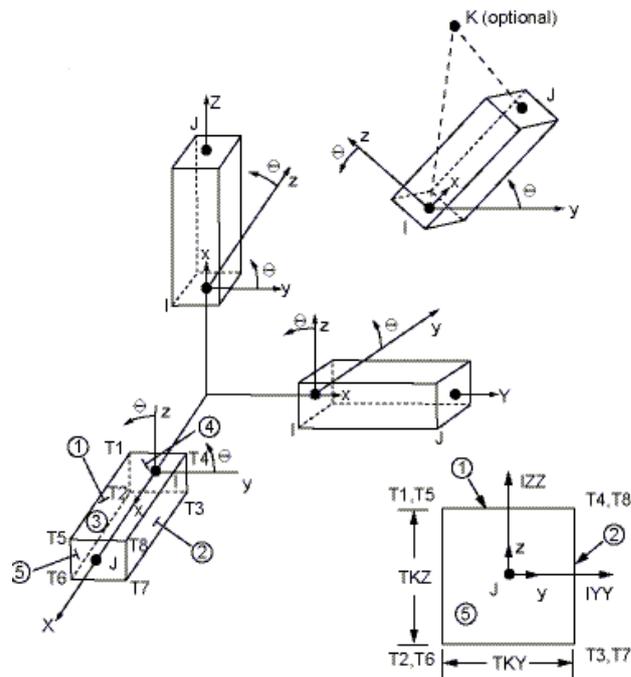


Figura 17: Elemento BEAM 4 (ANSYS, 2012)

4.3.3 MASS21

A Figura (18) ilustra o elemento MASS21 e suas principais características são apresentadas a seguir:

- Apresenta seis graus de liberdade em cada um dos seus nós, translações nas direções X, Y e Z e rotações em torno das mesmas direções.
- O MASS21 trata-se de um elemento pontual que permite simular massa e inércia tanto em translação como em rotação.

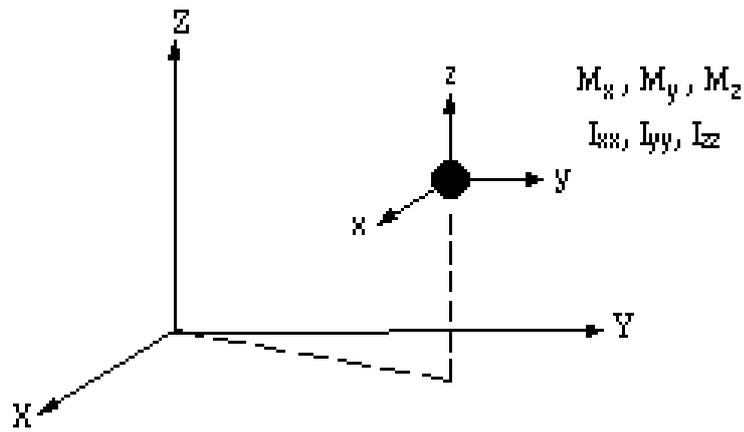


Figura 18: MASS21 (ANSYS, 2012)

4.3.4 COMBIN14

A Figura (19) ilustra o elemento COMBIN14 e suas principais características são apresentadas a seguir:

- Apresenta 6 graus de liberdade em cada um dos seus dois nós (I e J), translações em X, Y e Z e rotações em torno das mesmas direções.
- O elemento COMBIN14 é um elemento uniaxial apto para simular rigidez e amortecimento, tanto longitudinal quanto o torsional.

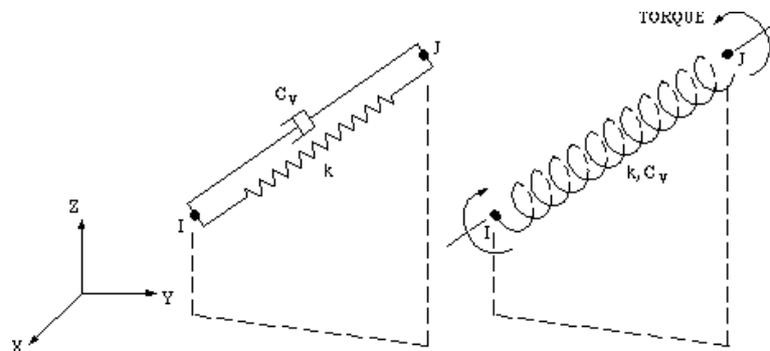


Figura 19: Elemento COMBIN14 (ANSYS, 2012)

4.4 ANÁLISE DINÂMICA

A análise modal realizada no ANSYS 13.0 (2012), permite determinar as características dinâmicas da estrutura em estudo, como as frequências naturais da estrutura e os modos de vibração. Esta análise ainda abre caminho para realização posterior de análises dinâmicas, mais aprofundadas da estrutura, como análises transientes, análise da resposta harmônica e de espectro.

Entre os métodos de extração dos modos de vibração da estrutura o ANSYS R13.0 permite utilizar métodos como o Block Lanczos, O PCG Lanczos e o Reduzido (Reduced). O método de extração utilizado no presente trabalho foi o Block Lanczos devido à rápida convergência de resultados obtida com o método.

A análise transiente é a técnica utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura submetida a um carregamento dependente do tempo. Essa análise pode ser utilizada para determinar os deslocamentos, deformações, tensões e forças na estrutura ao longo do tempo em que ocorre o carregamento (Lima, 2007).

Na análise transiente o programa resolve a equação do movimento apresentada no capítulo anterior como equação (1). Neste tipo de análise os efeitos de inércia e amortecimento são considerados importantes para obtenção da resposta final da estrutura em um dado período de tempo.

O ANSYS R13.0 disponibiliza três métodos para realizar a análise transiente. O método completo (Full Method), o método da superposição modal (Mode superposition) e o método reduzido (Reduced). O método completo (Full) foi o utilizado neste trabalho, pois apesar do custo computacional, este método trata-se de um método de fácil utilização e apresenta menos restrições quando comparado aos outros métodos.

4.5 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

O *software* ANSYS 13 pode realizar fundamentalmente dois tipos de otimização: a otimização paramétrica e a otimização topológica. A otimização paramétrica trata-se de uma otimização de design, sendo realizada completamente em linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), e está contida em um módulo específico do ANSYS, o módulo (/OPT). Na otimização topológica se encontra a melhor distribuição de material em um corpo de acordo com critérios determinados. A otimização topológica não pode ser executada no módulo (/OPT) e não exige o uso da linguagem APDL.

O módulo (/OPT) do ANSYS R13.0, no qual a otimização paramétrica é executada, utiliza técnicas matemáticas que integram o ciclo de projeto manual em um processo computadorizado (Santos, 2013). Este processo é executado automaticamente até que um projeto ótimo que satisfaça todas as restrições seja alcançado. No módulo de otimização (/OPT) do ANSYS, são utilizadas três variáveis que caracterizam o processo de otimização: variáveis de projeto (DV - *Design Variables*), variáveis de estado (SV - *State Variables*), e função objetivo (OF - *Objective Function*). Essas variáveis são representadas por parâmetros escalares na linguagem APDL, e podem sofrer modificações durante o processo iterativo de otimização até que o resultado ótimo seja alcançado.

O processo de execução de otimização estrutural no otimizador do ANSYS pode ser especificado nas seguintes etapas: elaboração do modelo ou problema a ser analisado; especificação do tipo de análise e execução; declaração das variáveis de projeto; definição do método de otimização; iniciação do processo de otimização e verificação dos resultados obtidos (*Set List*). A Figura 20, ilustra o fluxo do processo de execução de otimização estrutural no ANSYS.

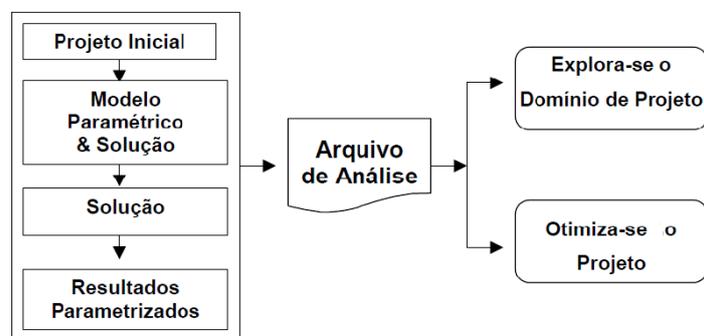


Figura 20: Fluxo do processo de execução de otimização no ANSYS (Marinho, 2002)

No processo de execução de otimização no ANSYS, além da utilização da linguagem de programação própria do ANSYS, a linguagem APDL, pode-se ainda fazer uso da interface

gráfica de usuário (GUI) para executar o processo de otimização de forma interativa. O uso da linguagem APDL ou o modo interativo GUI vai depender da familiaridade e preferência do projetista em relação aos dois modos de operar o *software*.

Quanto aos métodos de otimização, o ANSYS disponibiliza dois métodos para otimização: o método de primeira ordem e o método de aproximação por subproblemas. O ANSYS permite ainda a implementação de um algoritmo externo.

O método de primeira ordem (*First Order Method*) é um método que utiliza informações de derivadas, sendo considerado o método de aproximação mais preciso. O método de aproximação por subproblemas ou ordem zero (*Subproblem Approximation Method*) é um método avançado de ordem zero, não necessita do cálculo de derivada e pode ser eficientemente empregado na maior parte de problemas práticos de engenharia. O método implementado pelo usuário (*User-supplied Method*) é uma rotina de otimização externa que pode ser usada em vez da lógica do otimizador do ANSYS (Santos, 2013). Neste projeto de otimização foi utilizado o método de primeira ordem devido a sua precisão em relação aos outros métodos presentes no ANSYS.

O método de primeira ordem faz uso das informações provenientes do cálculo de derivadas, e a cada interação, são realizadas subiterações que incluem busca de direção e dos gradientes, isto é, no método de primeira ordem, a cada iteração serão realizados vários ciclos de análise. Neste método, o algoritmo transforma um problema com restrições em um problema sem restrições, por meio de funções de penalidade, conforme pode ser observado pela equação (25) fornecida pelo ANSYS (2012).

$$Q(\mathbf{X}, S) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_X(X_i) + q \left(\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) \right) \quad (25)$$

No qual:

$Q(\mathbf{X}, S)$: É uma a função objetivo sem restrição adimensional.

P_X, P_g, P_h : São penalidades aplicadas restrições das variáveis de projeto e variáveis de estado.

f_0 : Função objetivo de referência.

\mathbf{X} : Vetor que contém as variáveis de projeto.

q: Parâmetros de superfície de resposta, que verifica se as restrições impostas são satisfeitas.

n: Número de variáveis de projeto.

Na equação (25) acima apresentada, as funções de penalidade (P_x) são aplicadas às variáveis de projeto e as funções de penalidade (P_g, P_h) são aplicadas às variáveis de estado.

Em cada iteração no processo de otimização (j), um vetor de direção de busca $\mathbf{d}^{(j)}$ é determinado. A próxima iteração (j+1) é realizada pela eq. (26), abaixo apresentada.

$$\mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} + S_j \mathbf{d}^{(j)} \quad (26)$$

No qual S_j é o tamanho do passo e corresponde ao valor mínimo da função objetivo Q na direção $\mathbf{d}^{(j)}$.

O tamanho de passo S_j é uma combinação de um algoritmo de “Seção-áurea” e uma técnica de aproximação quadrática local (ANSYS, 2012). O intervalo de variação de S_j é limitado pela eq. (27) abaixo apresentada.

$$0 \leq S_j \leq \frac{S_{\max}}{100} S_j^* \quad (27)$$

Onde

S_j^* : É o maior tamanho possível do passo na direção de busca da atual iteração calculado internamente pelo *software*.

S_{\max} : É o tamanho máximo do passo na direção de busca em termos percentuais.

O processo de minimização apresentado pela eq. (25), está relacionado a geração sequencial de direções de busca e ajustes dos parâmetros internos de superfície q. Para interação inicial (j=0), a direção da busca é assumida como o gradiente negativo da função objetivo sem restrições, como apresentado na eq. 28 (ANSYS, 2012).

$$\mathbf{d}^{(0)} = -\nabla Q(\mathbf{X}^{(0)}, q) = \mathbf{d}_f^{(0)} + \mathbf{d}_p^{(0)} \quad (28)$$

Sendo:

$$q = 1 \quad (29)$$

$$\mathbf{d}_f^{(0)} = -\nabla Q_f(\mathbf{X}^{(0)}) \quad (30)$$

$$\mathbf{d}_p^{(0)} = -\nabla Q_p(\mathbf{X}^{(0)}) \quad (31)$$

Para iterações no qual ($j > 0$), as direções conjugadas são formadas de acordo com a equação de recursão de Polak-Ribiere apresenta abaixo (ANSYS, 2012).

$$\mathbf{d}^{(j)} = -\nabla Q(\mathbf{X}^{(j)}, q_k) + r_{j-1} \mathbf{d}_f^{(j-1)} \quad (32)$$

Onde r_{j-1} é dado por:

$$r_{j-1} = \left| \frac{\nabla Q(\mathbf{X}^{(j)}, q) - \nabla Q(\mathbf{X}^{(j-1)}, q)}{|\nabla Q(\mathbf{X}^{(j-1)}, q)|^2} \right|^T \nabla Q(\mathbf{X}^{(j)}, q) \quad (33)$$

As iterações no método de primeira ordem irão ocorrer até a convergência ser alcançada ou quando as iterações terminarem. Essas duas condições são verificadas no final de cada iteração. A convergência da otimização é alcançada e o processo iterativo é finalizado de acordo com os critérios definidos pelas equações (34) e (35).

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \tau \quad (34)$$

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \tau \quad (35)$$

Onde:

τ : Tolerância da função objetivo.

$f^{(b)}$: Melhor arranjo encontrado.

$f^{(j-1)}$: Arranjo da iteração anterior.

Maiores informações referentes ao algoritmo de primeira ordem, presente no software ANSYS 13 podem ser encontrar no *ANSYS Theory Reference for Mechanical APDL and Mechanical applications* (2009).

5. ANÁLISE NUMÉRICA

5.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A torre de sustentação de aerogerador foi modelada no pacote de elementos finitos ANSYS R13.0, considerando a sua estrutura modelada como um elemento de viga engastada com seção circular vazada. O aerogerador foi modelado com uma massa concentrada na extremidade superior da torre para simular a nacele do aerogerador, a Figura (21) ilustra a geometria da torre a ser estudada.

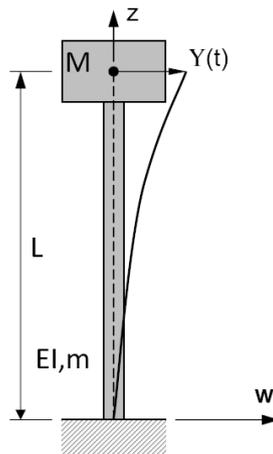


Figura 21: Torre modelada com elemento de massa na extremidade superior (Morais et al, 2009)

O aerogerador apresentado na Figura (21), foi analisado e modelado anteriormente por Murtagh et al (2007) e Morais et al (2009). O modelo da torre no qual iniciou-se a otimização é constituído de aço, é possui 60 m de altura, 3 m de largura e espessura da casca de 0.015m. O modulo de elasticidade e a densidade são respectivamente 2.0×10^{11} N/m² e 7850 kg/m³. A massa concentrada no topo da torre que simula a nacele é de 19.876 kg. As propriedades do aço estrutural ASTM-A36 no qual a torre é constituída podem ser observadas na Tabela (5).

Tabela 5: Propriedades do aço estrutural A-36 (Hibbeler, 2004)

Material		Densidade (mg/m ³)	Módulo de elasticidade		Tensão de escoamento (MPa)		Tensão última (MPa)		Coeficiente de Poisson
			E (GPa)	Transversal G (GPa)	Tração	Compressão	Tração	Compressão	
Liga de Aço	Estrutural A-36	7,85	200	75	250	250	400	400	0,32

As propriedades de massa e rigidez generalizada para o aerogerador modelado como um sistema reduzido a 1 grau de liberdade (1.G.L), foram obtidas por Moraes et al (2009), e são respectivamente $\bar{M} = 34899,0$ Kg e $\bar{K} = 463671,0$ N/m. Considerou-se a hipótese de estrutura sem amortecimento, logo $\bar{C} = 0$.

5.2 DISCRETIZAÇÃO DA ESTRUTURA

Para modelar a torre com elemento de viga, foram utilizadas as propriedades da torre, apresentadas na seção anterior. A estrutura da torre foi discretizada em 400 elementos utilizando o elemento BEAM188 e 402 nós. Na modelagem com elemento de viga cada elemento da torre possui 15 cm de comprimento, visto que, a torre apresenta 60 m de altura. Esta metodologia de modelagem do aerogerador em elementos finitos foi anteriormente adotada por Avila (2013) em análises dinâmicas e os resultados obtidos podem ser analisados na Tabela (6), demonstrando assim a validade do modelo adotado.

Tabela 6: Resultados anteriores para validação do modelo do aerogerador (Avila, 2013).

Modo	1G.L	BEAM4	SHELL93
1	0,58	0,56926	0,5714
2		0,84789	0,8492
3		-	2,8451
4		-	2,8560
5		4,231	4,1622
6		-	4,6242
7		-	4,6245
8		5,2910	5,1918
9		-	5,6234
10		-	5,6235

Na torre modelada como elemento de viga, foram impostas restrições nas translações nas direções X, Y e Z, assim como restrições as rotações em torno desses mesmos eixos nos nós localizados na base da torre para representar o engaste da estrutura. A massa concentrada na extremidade superior da torre foi modelada através do elemento MASS21.

5.3 MODELAGEM DO CARREGAMENTO ESTÁTICO

5.3.1 Carregamentos aplicados na torre

Neste trabalho, além da consideração de cargas oriundas da ação do vento, também foram considerados na avaliação da resposta estática da torre, o peso próprio da estrutura e o peso dos equipamentos da nacelle, representados por uma massa concentrada na parte superior da torre. A Figura (22) ilustra as condições de carregamento no qual a torre foi submetida na análise estática.

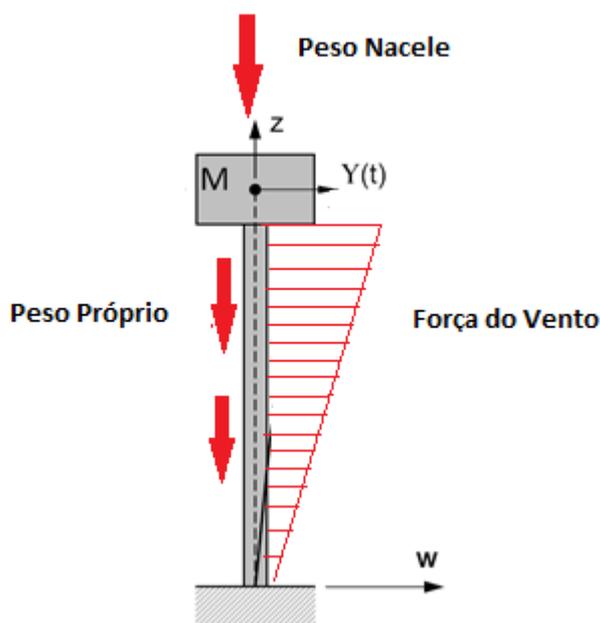


Figura 22: Carregamentos aplicados na análise estática. (Morais et al, 2009 com adaptações)

5.3.2 Recomendações da norma ABNT - NBR 6123

Para realizar a modelagem do carregamento proveniente da ação do vento na estrutura, utilizou-se as recomendações da norma brasileira ABNT-NBR 6123, analisando os carregamentos provenientes da ação do vento como forças estáticas.

De acordo com a ABNT-NBR 6123 (1988), os carregamentos estáticos do vento podem ser determinados a partir da velocidade básica do vento determinada de acordo com a localização da construção dentro do território brasileiro. A velocidade básica do vento (V_0), trata-se da velocidade de uma rajada de vento de três segundos, que em média, excede esse valor apenas uma vez no intervalo de 50 anos. Esta velocidade é medida a 10 m de altura em um campo aberto e plano. No Brasil os valores das velocidades básicas do vento podem ser

obtidos por meio de curvas isopleias, que utilizam dados estatísticos, baseados nos valores de velocidades máximas anuais em diversas cidades brasileiras. A Figura (23), apresenta uma curva isopleia de velocidade básica para o Brasil.

Em projetos no qual é necessário realizar a modelagem estrutural, a velocidade utilizada para fins de cálculos é a velocidade característica (V_K). A velocidade características pode ser obtida por meio da eq. (36), abaixo apresentada.

$$V_K = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (36)$$

Onde, S_1 , S_2 , S_3 são respectivamente, o fator topográfico, fator rugosidade e o fator estatístico. O fator topográfico S_1 , considera variações no relevo do terreno na região no qual será localizada a estrutura. Em terrenos planos ou fracamente acidentados $S_1 = 1$, quando existem taludes ou morros, o fator rugosidade S_1 varia de acordo com a altura medida e a inclinação do morro ou talude. Em vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção, o fator topográfico recebe o valor $S_1 = 0.9$.

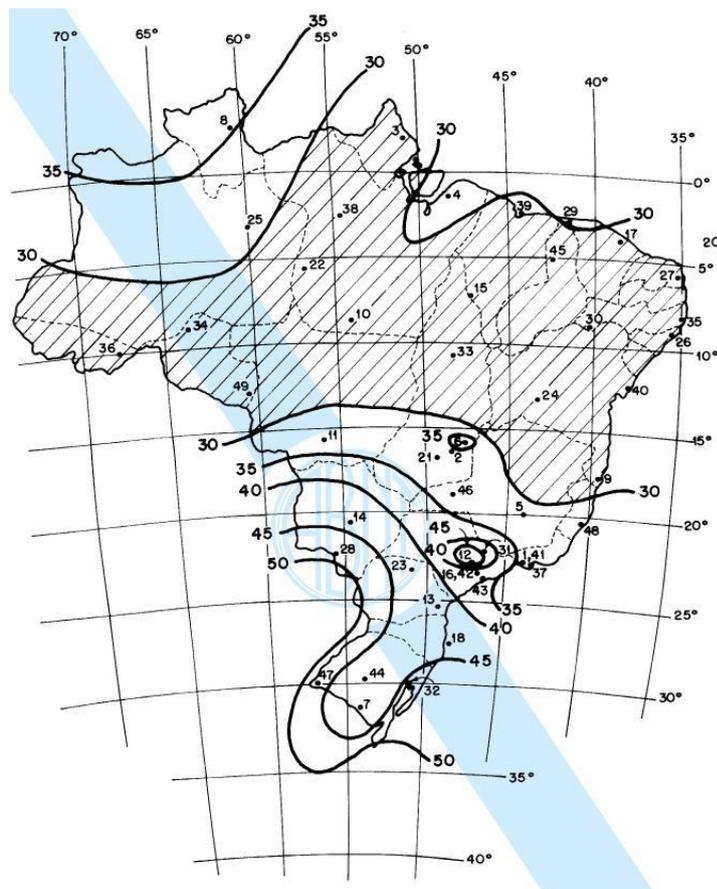


Figura 23: Isopleias de velocidade básica V_0 (m/s) ABNT-NBR 6123 (1988)

O fator rugosidade S_2 , considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação considerada. A ABNT-NBR 6123 fornece a seguinte equação para determinação do fator rugosidade S_2 .

$$S_2 = b F_R \left(\frac{Z}{10}\right)^P \quad (37)$$

Onde b , F_R e P são parâmetros meteorológicos disponibilizados pela Tabela (6), e Z representa o contorno superior da camada atmosférica.

Tabela 6: Fatores meteorológicos (ABNT-NBR 6123, 1988)

Categoria	Z (m)	Parâmetro	Classe		
			A	B	C
I	250	B	1,1	1,11	1,12
		P	0,06	0,065	0,070
II	300	B	1,00	1,00	1,00
		F_R	1,00	0,98	0,95
		P	0,085	0,09	0,10
III	350	B	0,94	0,94	0,93
		P	1,10	1,105	0,115
IV	420	B	0,86	0,85	0,84
		P	0,12	0,125	0,135
V	500	B	0,74	0,73	0,71
		P	0,15	0,16	0,175

O último fator para a determinação da velocidade característica do vento é o fator estatístico S_3 , que consoante a ABNT-NBR 6123, é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Os valores de S_3 dependem do tipo de edificação e os valores mínimos para o fator estatístico fornecidos pela norma poder ser observados na Tabela (7).

Tabela 7: Valores mínimos para o fator estatístico (ABNT-NBR 6123, 1988)

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e forças de segurança, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante construção.	0,83

A partir da velocidade característica do vento V_K , é possível calcular a pressão dinâmica do vento (q). A ABNT-NBR 6123 adota como condições normais de temperatura e pressão respectivamente, 15°C e 1 atm. Deste modo, a pressão dinâmica do vento (N/m²) pode ser calculada pela equação abaixo.

$$q = 0,613 V_K^2 \quad (38)$$

A força global (F_G) que o vento exerce sobre uma estrutura, é resultante da soma vetorial de todas as forças exercidas pelo vento sobre uma edificação ou parte dela. A componente da força global na direção do vento é obtida pela eq. (39), abaixo apresentada, onde (A) corresponde a área frontal efetiva, q a pressão dinâmica e C_a o coeficiente de arrasto.

$$F_G = C_a q A \quad (39)$$

5.3.3 Modelagem do Carregamento Proveniente da Ação do Vento na Estrutura.

O carregamento devido a ação do vento foi aplicado a estrutura da torre utilizando os conceitos básicos de carregamento equivalente. Este carregamento foi modelado de acordo com as recomendações da ABNT-NBR 6123 anteriormente expostas. Os parâmetros de projeto adotados na modelagem do carregamento aplicado a torre devido a ação do vento de acordo com as recomendações da norma brasileira são apresentados na Tabela (8).

Tabela 8: Parâmetros de projeto adotados na modelagem do carregamento de vento

Velocidade Básica do Vento (V_0)	45 m/s (Região do Rio Grande do Sul)
Fator Topográfico (S_1)	1,00
Categoria do Terreno	S2 = Categoria II, Classe C (b =1,0; Fr =0,95 e p = 0,10)
Fator Estatístico (S_3)	0,95 (Grupo 3)
Altura da Torre (Z)	60 m
Coefficiente de Arrasto (C_a)	0,6

A partir dos parâmetros selecionados na Tabela (8), é possível calcular o valor do fator rugosidade S_2 por meio da eq. (40), fornecida pela ABNT-NBR 6123.

$$S_2 = 0,95 \left(\frac{Z}{10}\right)^{0,10} \quad (40)$$

Deste modo, após a obtenção dos fatores S_1 , S_2 , S_3 é possível calcular a velocidade característica do vento (V_K). Assim, com os dados obtidos com a velocidade característica é possível calcular a pressão dinâmica (q), conforme pode ser observado na eq. (41).

$$q = 0,613 [45 \times 1 \times 0,95 \left(\frac{Z}{10}\right)^{0,10} \times 0,95]^2 \quad (41)$$

Deste modo, de acordo com a eq. (41), para cada altura da torre existe uma pressão dinâmica especificada (q) variando entre 0 (zero) na base da torre e a altura total da torre no topo, isto é, 60m.

Para fins de aplicação do carregamento, utilizou a força global F_G , que é a força que atua na torre na direção do vento e pode ser calculado por intermédio da equação (39). A força global pode ser representada por uma força distribuída ao longo do comprimento da torre. Na Figura (24) pode ser observado a força global F_G aplicada ao longo da torre.

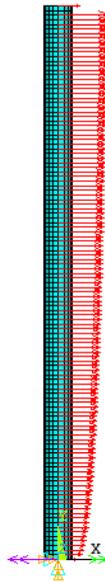


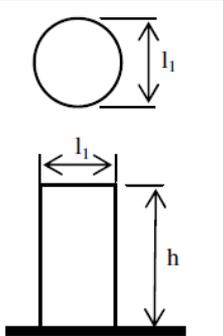
Figura 24: Força global aplicada ao longo da torre na análise estática

Para barras de seção circular lisas de metal, como torres eólicas, o coeficiente de arrasto utilizado na eq. (39) é tabelado pela ABNT-NBR 6123 de acordo com a razão entre a altura e o diâmetro da torre e ainda depende do número de Reynolds como pode ser observado na Tabela (9). O número de Reynolds pode ser dado por:

$$Re = 7000 \cdot V_k \cdot d \quad (42)$$

onde V_k é a velocidade característica e d o diâmetro da torre.

Tabela 9: Coeficiente de arrasto C_a (ABNT-NBR 6123, 1988)

	$Re \times 10^{-5}$	h / l_1						
		1/2	1	2	5	10	20	∞
$\leq 3,5$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
$\geq 4,2$	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6

Deste modo, considerando uma torre de 60 m e diâmetro 3 m, o coeficiente de arrasto adotado neste trabalho foi de 0,6.

5.4 ESPECTRO DE POTÊNCIA: MODELO DE DAVENPORT

Na análise transiente, utilizou-se um espectro de potência de Davenport utilizado no trabalho de Shzu et al. (2015). Utilizou-se um espectro de potência, pois através da utilização de um espectro de potência é possível estudar vibrações aleatórias em estruturas, proporcionando aproximações a uma excitação fisicamente possível. Oliveira (2012) apud Blessman (1995), afirmam que a principal aplicação do espectro de potência está na determinação da composição em frequência de um processo aleatório, definindo dessa forma uma maneira de se determinar um acelerograma.

Os espectros de potência são dependentes das características do movimento e podem apresentar diferenças significativas de um caso para o outro, fazendo com que a escolha de um espectro de potência padrão seja um processo complexo.

Neste trabalho foi utilizado o modelo de Davenport para a simulação da força aplicada na estrutura. Este modelo de Davenport é baseado em um grande número de medições realizadas em terrenos de diversas rugosidades e altitudes. O modelo de Davenport sugere as seguintes equações para a função de densidade espectral da componente longitudinal da turbulência, em ventos fortes (Blessmann, 1995).

$$S_1(f) = \frac{2X_1^2}{3(1+X_1^2)^{\frac{4}{3}}} \frac{S_0}{f} \quad (42)$$

$$X_1 = \frac{1200f}{V(10)} \quad (43)$$

$$S_W(f) = \rho_a^2 C_d^2 \bar{V}(10)^2 A^2 S_1(f) \quad (44)$$

Onde,

$S_1(f)$: Densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência f .

S_0 : Densidade espectral do ruído branco.

f : Frequência em Hertz.

X_1 : Densidade espectral do ruído branco.

$V(10)$: Velocidade média horária a 10m de altura, em m/s

$S_W(f)$: Densidade espectral da força do vento na frequência f .

ρ_a : Massa específica do ar.

C_d : Coeficiente de arrasto modelo de Davenport.

A: Área projetada.

A curva correspondente a esse espectro é apresentada na Figura (25).

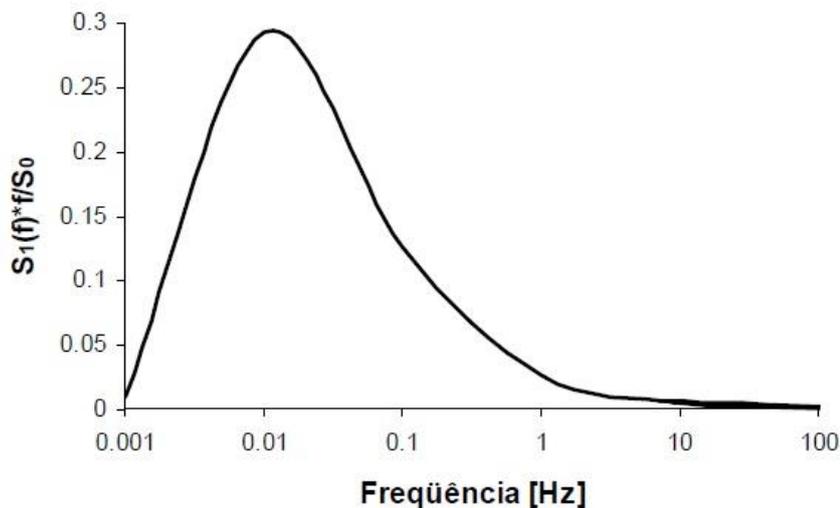


Figura 25: Espectro de Davenport (Zuluaga, 2007)

5.5 PRIMEIRO MODELO NUMÉRICO: ANÁLISE ESTÁTICA

5.5.1 Análise estática linear do projeto inicial da torre

A análise estática linear do projeto inicial da torre foi a primeira fase do processo de otimização. Nessa fase foram investigadas e identificadas variáveis importantes para o projeto, como deslocamento máximo e tensão de equivalente de von misses, utilizadas posteriormente no processo de otimização.

Na Figura (26) pode ser observado o deslocamento horizontal máximo na torre, considerando a aplicação de um carregamento de vento modelado de acordo com as recomendações da ABNT-NBR 6123, o peso próprio da torre e o peso da massa concentrada no topo da torre. O valor máximo para o deslocamento horizontal na torre inicial antes da otimização foi $5,8810 \cdot 10^{-5}$ m.

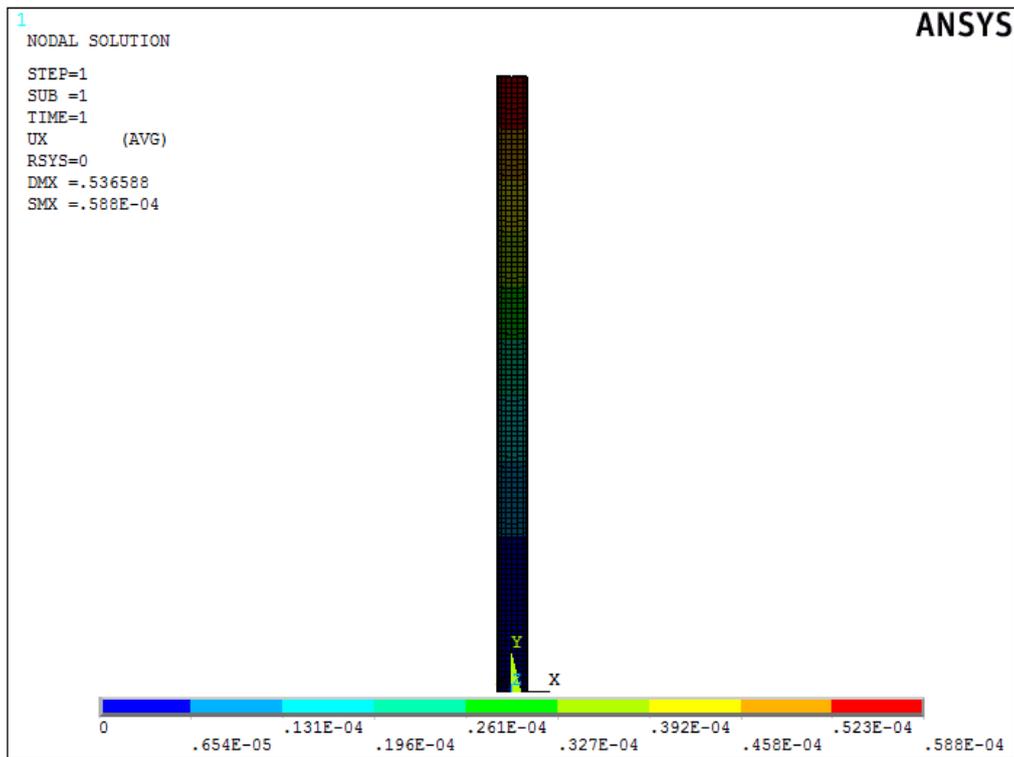


Figura 26: Deslocamento máximo projeto inicial

A Figura (27) ilustra a distribuição das tensões de von mises na torre, devido a ação da força do vento modelado com uma velocidade básica de 45 m/s, velocidade característica da região do estado do Rio Grande do Sul.

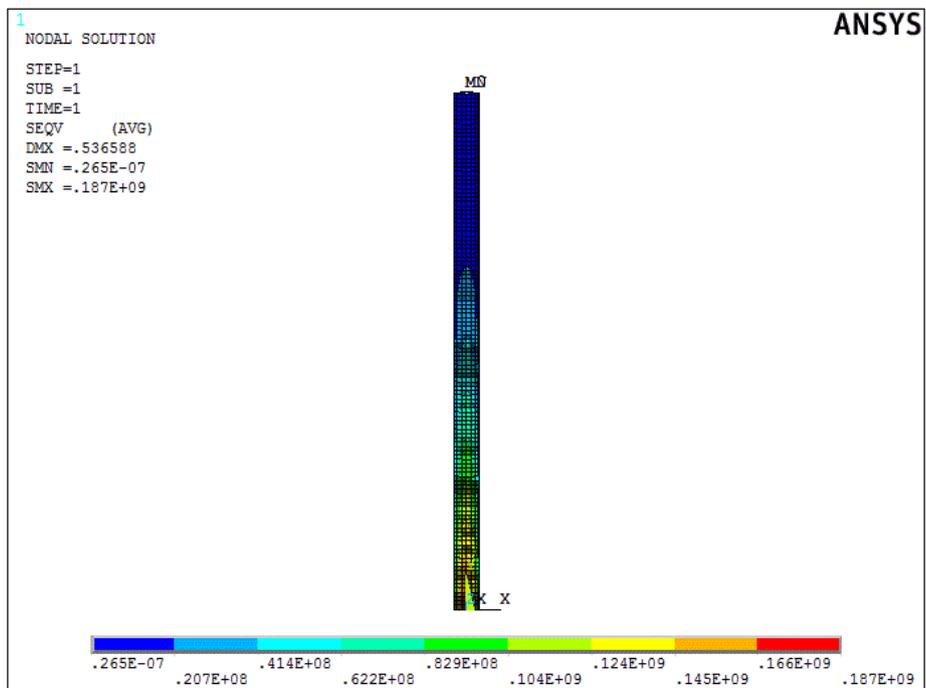


Figura 27: Tensão de von mises Torre Inicial

Nesta análise observou-se que o valor máximo da tensão de von mises ocorreu na base da torre e foi de 187 Mpa, e esta tensão não violou a tensão de escoamento do aço ASTM A-36 que é 250 Mpa.

5.5.2 Descrição do modelo numérico

Neste primeiro modelo numérico buscou-se encontrar uma torre com menor volume possível de modo a diminuir os custos com materiais. Assim, buscou-se minimizar o volume da torre e indiretamente reduzir os custos com materiais na construção da torre.

Neste modelo foram considerados os esforços provenientes do carregamento axial da massa concentrada no topo da torre, que representa o peso da nacela do aerogerador. Também foram adotados os esforços provenientes da carga de vento trapezoidal, modelada de acordo com as recomendações da norma ABNT-NBR 6123 e o peso próprio da torre.

Neste problema de otimização, foi utilizado o algoritmo de otimização de primeira ordem presente na biblioteca do ANSYS R13.0. Tal problema de otimização, pode ser representado pelas equações apresentadas a seguir.

Volume da torre como função objetivo definida por:

$$\text{volume}(x) = \sum_{j=1} AL \quad (45)$$

onde:

L: altura da torre.

A: área de seção tubular transversal.

A área de seção tubular transversal da torre pode ser calculada pela eq. (46). Sendo R o raio externo da torre e r o raio interno.

$$A = \pi(R^2 - r^2) \quad (46)$$

As variáveis de projetos utilizadas nesta análise foram a espessura da casca e os raios internos e externos da base e do topo da torre. Quanto as restrições consideradas neste problema de minimização, foram consideradas as seguintes restrições mecânicas de desigualdade:

1. Restrição de deslocamento horizontal no topo da torre.

$$\delta < \delta_{\text{Max}} \quad (47)$$

No qual:

δ : Deslocamento no topo da torre.

δ_{Max} : Deslocamento máximo horizontal admissível.

A restrição de deslocamento máximo foi modelada de acordo com as recomendações da norma europeia Eurocode 3-2 (2004). Esta norma recomenda que o deslocamento horizontal máximo no topo da torre não seja superior ao calculado pela eq. (48).

$$\delta_{\text{Max}} = \frac{L}{50} = 1.2 \text{ m} \quad (48)$$

onde,

δ_{Max} : deslocamento máximo recomendado pela norma Eurocode 3-2.

L: altura da torre.

Desta forma, para a torre em estudo, o limite máximo para o deslocamento horizontal no topo da torre é 1.2 m de acordo com a Eurocode.

2. Restrição relativa a tensão máxima equivalente, que inclui todas as tensões multidirecionais. A restrição relativa a tensão equivalente máxima é representada pela eq. (49).

$$\sigma \leq \sigma_{\text{Max}} \quad (49)$$

Onde,

σ : tensão máxima de von mises.

σ_{Max} : tensão admissível.

A tensão admissível foi calculada de acordo com a eq. (50). Nesta equação, $\sigma_{\text{última}}$ é a tensão última do aço ASTM - A36 (400 Mpa) e FS é o fator de segurança, que neste trabalho foi adotado o fator 2.

$$\sigma_{\text{Max}} = \frac{\sigma_{\text{última}}}{\text{FS}} \quad (50)$$

Deste modo, a tensão admissível σ_{Max} neste projeto foi 200 Mpa.

3. Restrição relativa a espessura mínima, esta restrição limita o valor mínimo da espessura da casca da torre ao menor valor de espessura comercial de uma chapa de aço ASTM-A36. Esta restrição pode ser representada pela eq. (51).

$$e \geq e_{\min} \quad (51)$$

Onde e é o valor da espessura e e_{\min} é o valor da espessura mínima, sendo 0.005 m.

Assim, este primeiro modelo numérico de otimização buscou:

Minimizar a função volume:

$$\text{Volume}(x) = \sum_{j=1} AL \quad (52)$$

Submetidas as seguintes restrições:

$$\delta < \delta_{\text{Max}} \quad (53)$$

$$\sigma \leq \sigma_{\text{Max}} \quad (54)$$

$$e \geq e_{\min} \quad (55)$$

$$X_i \leq X \leq X_S \quad (56)$$

Sendo o X vetor que contém as variáveis de projeto, e X_i e X_S são respectivamente os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto.

5.5.2 Aplicação da otimização

Neste problema de otimização foi realizada uma análise estática linear de uma torre eólica modelada como elemento de viga de Timoshenko, no qual foram impostas restrições mecânicas de desigualdade. Na formulação do problema foi necessário estabelecer limites inferiores e superiores para as variáveis de projeto para delimitar o domínio de modificação destas variáveis. Na Tabela (9) são definidas as variáveis de projeto.

Tabela 9: Variáveis de projeto e seus limites inferiores e superiores

Variável	Valor Inicial	Limite Inferior	Limite Superior
Espessura da base	0.015 m	0.005 m	0.015 m
Espessura do Topo	0.015 m	0.005 m	0.015 m
Raio Externo da base	1.5 m	1 m	5 m
Raio externo do topo	1.5 m	1 m	5 m
Raio interno da base	1.485 m	0.995 m	4.995 m
Raio interno do topo	1.485 m	0.995 m	4.995 m

Quanto as variáveis de projeto, em relação as espessuras da base e do topo da torre, foi adotado como limite inferior, a espessura comercial mínima para chapas fabricadas em aço

ASTM A-36, sendo este valor 0.005 m (Feijó, 2010). O limite superior para as espessuras foi a espessura inicial da casca da torre, 0.015 m. O limite inferior para o raio externo da torre foi 1 m e o limite superior foi 5 m, este limite superior para o raio foi utilizado levando-se em consideração que torres eólicas apresentam no máximo raio igual a 5 m devido a limitações de transporte e montagem.

As restrições mecânicas de projeto, foram obtidas conforme explicado na seção anterior, o limite para tensão máxima equivalente de von mises foi definido como a tensão admissível e a restrição de deslocamento foi calculada conforme as recomendações da norma Eurocode 3-2 (2004). A Tabela 10, apresenta os valores iniciais e os limites das restrições de projeto.

Tabela 10: Valor inicial e limites inferiores e superiores das restrições de projeto.

Restrição	Valor Inicial	Limite Inferior	Limite Superior
σ (Mpa)	186.5	-	200
δ (m)	$5.8810 \cdot 10^{-5}$	-	1.2

A função objetivo no qual busca-se minimizar é o volume da torre e não existe a necessidade do estabelecimento de limites inferiores e superiores para a função objetivo. Na Tabela (11) pode ser observado o valor inicial da função objetivo.

Tabela 11: Valor inicial da função objetivo

Função Objetivo	Valor Inicial
Volume(x)	$8.4395 m^3$

No processo de otimização, inicia-se a simulação com o valor inicial das variáveis de projeto. No otimizador do ANSYS são realizados os cálculos dos gradientes das funções do modelo e por meio desses cálculos, o problema com restrições é convertido em um problema sem restrições e, a cada iteração, a viabilidade e convergência são verificadas até que se atinja uma configuração ótima (Santos, 2013).

Neste projeto de otimização, utilizou-se os raios internos como variáveis de projeto. O raio externo da base e do topo foram utilizados como parâmetros fixos. Nesse sentido, para cada análise o valor de raio externo fixado, o raio interno poderia variar entre o limite inferior e o limite superior para essa variável, de modo a garantir uma espessura mínima da casca da torre. Na Figura (28), pode ser observada a variação do volume da torre em direção ao volume ótimo. Cada ponto do gráfico corresponde a uma análise, no qual se é fixado um valor para o raio externo, variando-se apenas o raio interno.

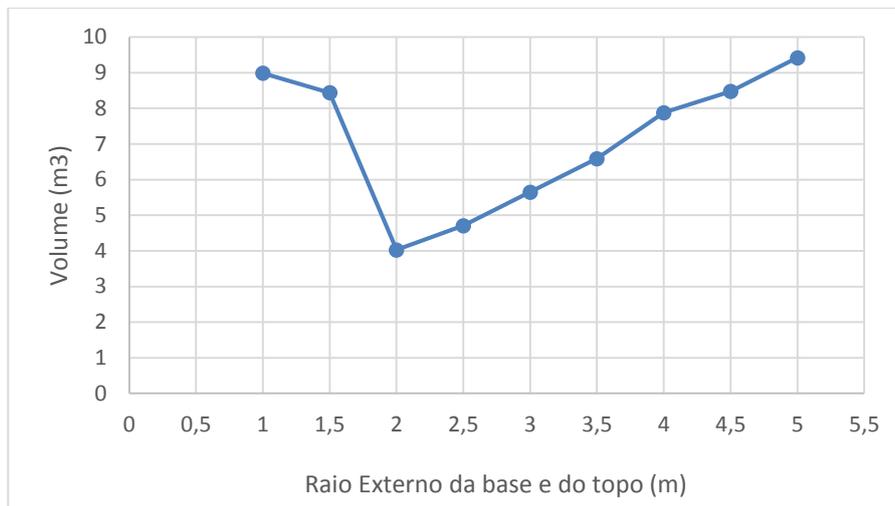


Figura 28: Variação do volume em função da variação do raio externo da base e do topo da torre

Na Figura (28), pode ser observado que foram fixados 9 valores para o raio externo da base e do topo. Para cada valor de raio externo da base e do topo obteve-se um volume mínimo. O melhor projeto foi encontrado para os valores de raio externo igual a 2m e raio interno igual a 1.9950 m.

São apresentados, na Tabela 12, os resultados ótimos quando fixou-se os raios externos de 2m.

Tabela 12: Variáveis de Projeto, valores ótimos para os raios externos de 2m.

Variável	Valor ótimo
Espessura da base	0.005m
Espessura do topo	0.005 m
Raio interno da base	1.9950 m
Raio interno do topo	1.9950 m

Tabela 13: Restrições de projeto, valores ótimos para os raios externos de 2m.

Restrição	Valor ótimo
σ (Mpa)	138.83
δ (m)	$7.3998 \cdot 10^{-5}$

Tabela 14: Função objetivo, valores ótimos para os raios externos de 2m.

Função Objetivo	Valor ótimo
Volume(x)	$3.7650 m^3$

Para o raio externo fixado em 2m foi alcançado o melhor resultado para função objetivo. Comparando os resultados com os da torre de raio externo de 1,5, houve uma redução de 55,3% do volume da torre. A restrição de projeto tensão atingiu 138,83 Mpa, representando 69.4% do limite superior imposto para essa restrição. A restrição de deslocamento máximo horizontal,

atingiu o valor de $7,3998 \cdot 10^{-5}$ m, apresentando significativo distanciamento em relação ao limite superior de 1.2 m, calculado de acordo com as recomendações da norma Eurocode 3.

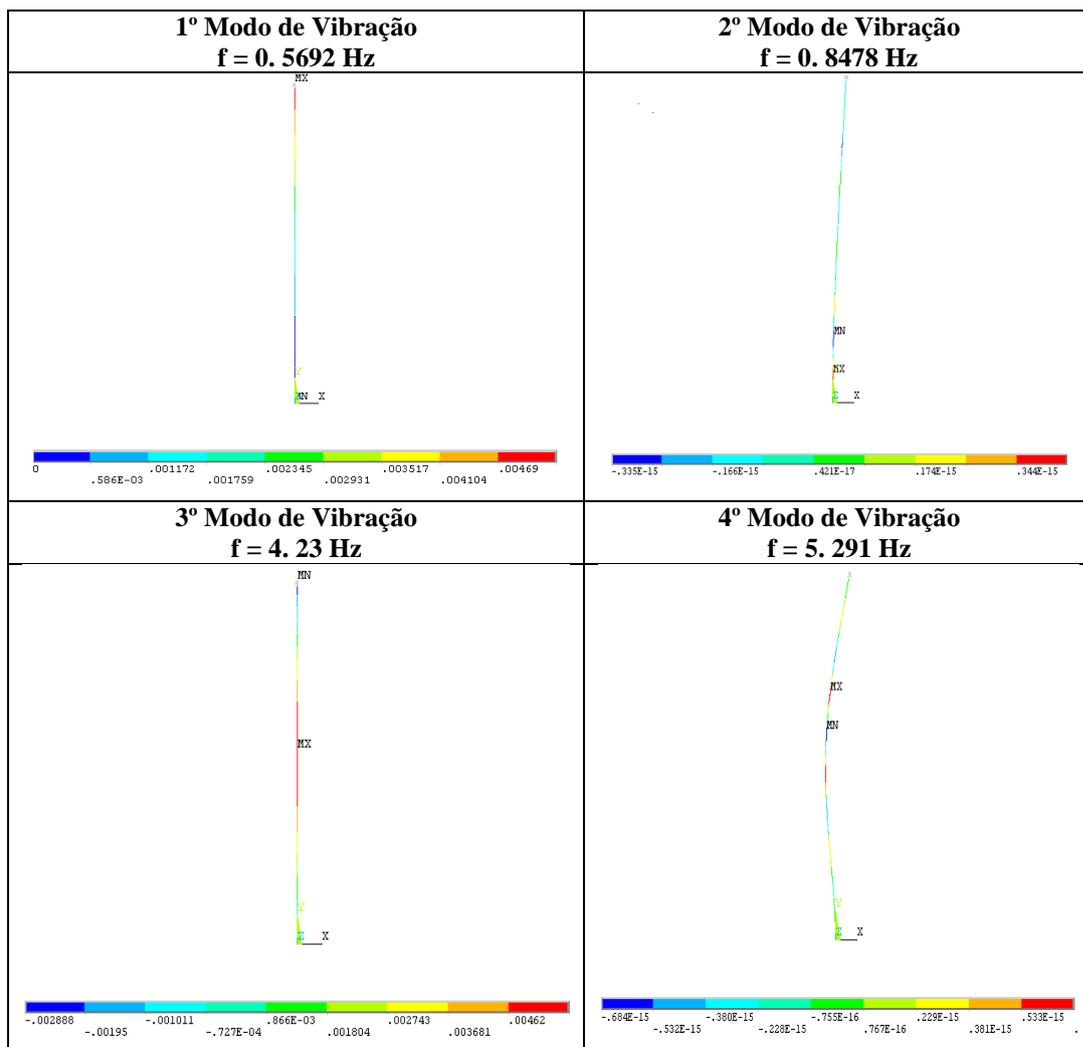
5.6 SEGUNDO EXEMPLO NUMÉRICO: ANÁLISE MODAL

5.6.1 Análise modal do projeto inicial da torre

A análise modal do projeto inicial da torre permitiu investigar o comportamento inicial da torre em termos das frequências de vibração e seus respectivos modos, permitindo desta maneira conhecer essas variáveis que serão utilizadas posteriormente, no processo de otimização.

A análise modal realizada no projeto da torre de raio 1,5 m teve como objetivo obter as 4 primeiras frequências naturais de vibração da estrutura e os modos de vibração associados a essas frequências. A Tabela (17) ilustra os resultados preliminares obtidos na análise modal.

Tabela 17: Primeiros 4 modos de vibração com suas respectivas frequências naturais de vibração



5.6.2 Aplicação de Otimização

Neste problema de otimização foi realizada uma análise modal da torre de raio externo de 1.5 m. Neste modelo numérico, a primeira frequência natural da torre foi utilizada como restrição de projeto. Na formulação do problema, foi necessário estabelecer limites inferiores e superiores para as variáveis de projeto para delimitar o domínio de modificação destas variáveis.

Na análise modal, a restrição de projeto foi a primeira frequência natural da estrutura, devido a importância do primeiro modo de vibração na resposta da torre (Burton, 2001). O limite inferior para essa restrição de projeto foi a frequência obtida na torre do projeto inicial, ou seja, 0.5692 Hz e o limite superior foi a frequência de passo das pás calculada pela eq. (57).

$$BPF = \left(n * \frac{B}{60} \right) * 0.9 \quad (57)$$

Onde BFF (*Blade Passing Frequency*) é a frequência de passo das pás, n é o número de rotações em rpm e B é o número de pás (Burton, 2001).

Foi utilizado a frequência de passo das pás como limite superior, para evitar que a frequência natural da torre modelada chegasse próximo aos valores de frequências de ressonância, que podem ser ocasionadas por flutuações no impulso do rotor na frequência de passo das pás, assim multiplicou-se a eq. (57) por 0.9, para garantir que a frequência máxima atingida pela estrutura, possa ser sempre inferior aos valores de frequência próximos a região de ressonância.

Na Tabela (18), podem ser observados os valores iniciais e os limites inferior e superior das restrições de projeto da análise modal.

Tabela 18: Valor inicial e limites inferiores e superiores das restrições de projeto.

Restrição	Valor Inicial	Limite Inferior	Limite Superior
f_1	0.5692 Hz	0.56786 Hz	1.35 Hz

Assim como no problema anterior a função objetivo no qual busca-se minimizar, foi volume da torre. Na Tabela (19) pode ser observado novamente o valor inicial da função objetivo.

Tabela 19: Valor inicial da função objetivo

Função Objetivo	Valor Inicial
Volume(x)	8.4395 m ³

Os resultados obtidos no processo de otimização neste exemplo numérico são apresentados nas Tabelas (20), (21) e (22).

Tabela 20: Variáveis de Projeto, valores iniciais e ótimos

Variável	Valor Inicial	Valor ótimo
Raio externo da base	1.5 m	2 m
Raio externo do topo	1.5 m	2 m
Raio interno da base	1.485 m	1.9950 m
Raio interno do topo	1.485 m	1.9950 m

Tabela 21: Restrições de projeto, valores iniciais e ótimo.

Restrição	Valor Inicial	Valor ótimo
f_1	0.56786 Hz	0.58438 Hz

Tabela 22: Função objetivo valores iniciais e ótimos

Função Objetivo	Valor Inicial	Valor ótimo
Volume(x)	8.4395 m ³	3.7650 m ³

Neste segundo modelo numérico, foi constatado que a utilização da primeira frequência de vibração da estrutura isoladamente como restrição de projeto, permitiu um grande domínio de variação das variáveis de projeto, permitindo assim a obtenção de um volume ótimo semelhante ao da análise estática, isto é, com o menor volume possível sem violar a restrição de espessura mínima. Deste modo, constatou-se que neste modelo numérico, a utilização da primeira frequência isoladamente como restrição de projeto, conduziu o resultado da otimização ao mínimo volume ótimo possível, isso ocorreu devido ao grande domínio de variação dessa restrição de projeto, fazendo com que o volume ótimo pudesse ser obtido com pouca influência desta restrição de projeto.

5.7 TERCEIRO EXEMPLO NUMÉRICO: TORRE EM TRONCO DE CONE

No terceiro exemplo numérico realizou-se análise estática linear e modal da torre e posteriormente executou-se o processo de otimização de modo a encontrar uma torre com o menor volume possível. Neste exemplo numérico analisou-se a torre de sustentação com a

possibilidade da geometria da torre que inicialmente era cilíndrica tornar-se um tronco de cone. As restrições de projeto neste exemplo numérico foram o deslocamento máximo horizontal, a tensão admissível e a primeira frequência natural da estrutura. As restrições mecânicas foram semelhantes as adotadas no primeiro exemplo numérico e as restrições da frequência natural foram semelhantes as utilizadas na análise modal do segundo exemplo numérico. Essas restrições de projeto podem ser observadas na Tabela (23).

Tabela 23: Valor inicial e limites inferiores e superiores das restrições de projeto.

Restrição	Limite Inferior	Limite Superior
σ (Mpa)	-	200
δ (m)	-	1.2
f_1 (Hz)	0.56	1.35

Neste modelo foram considerados os esforços provenientes do carregamento axial da massa concentrada no topo da torre, os esforços provenientes da carga de vento trapezoidal, modelada de acordo com as recomendações da norma ABNT-NBR 6123 e o peso próprio da torre. O valor do volume do projeto inicial da torre de raio 1,5 m antes do processo de otimização pode ser observado na Tabela (24).

Tabela 24: Valor inicial da função objetivo

Função Objetivo	Valor Inicial
Volume(x)	8.4395 m ³

Deste modo, o problema de otimização neste exemplo numérico pode ser representado pelas equações apresentadas a seguir.

Minimizar a função volume:

$$\text{Volume}(x) = \sum_{j=1} AL \quad (58)$$

Submetidas as seguintes restrições:

$$\delta < \delta_{\text{Max}} \quad (59)$$

$$\sigma \leq \sigma_{\text{Max}} \quad (60)$$

$$\mathbf{e} \geq \mathbf{e}_{\text{min}} \quad (61)$$

$$X_i \leq X \leq X_S \quad (62)$$

Onde o X vetor que contém as variáveis de projeto, e X_i e X_S são respectivamente os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto.

Na Tabela (25) são apresentados os resultados obtidos no processo de otimização estrutural da torre neste exemplo numérico.

Tabela 25: Resultados ótimo torre cônica

Parâmetro	Projeto Inicial	Projeto ótimo torre tronco de cone
Frequência Natural	0. 5692 Hz	0,61332 Hz
Raio da Base externo	1,5 m	1,7 m
Raio da Base interno	1,485 m	1,6850 m
Raio do topo externo	1,5 m	1,00 m
Raio do Topo interno	1,485 m	0,99500 m

Na Tabela (26) são apresentados os resultados para função objetivo volume do projeto ótimo da torre com geometria de tronco de cone.

Tabela 26: Comparação entre resultados

Parâmetro	Projeto Inicial	Projeto ótimo torre cônica
Volume (x)	8.4395 m^3	5.2889 m^3

Observa-se que tomando-se como variáveis de projetos todos os parâmetros geométricos da seção transversal da torre, recai-se num formato de cone, justificando desta forma a adoção na prática deste formato.

5.8 QUARTO MODELO NUMÉRICO: ANÁLISE TRANSIENTE

5.8.1 Descrição do modelo numérico

Neste quarto modelo numérico, procedeu-se com a otimização da torre de sustentação do aerogerador submetida a um carregamento transiente. Neste modelo, assim como nos modelos numéricos apresentados anteriormente, a função objetivo do projeto foi a minimização do volume da torre.

Neste modelo também foram considerados os esforços provenientes do carregamento axial da massa concentrada na extremidade superior do aerogerador que representa o peso da nacelle. Assim como os esforços provenientes de um carregamento transiente modelado como

espectro de potência de Davenport e por fim foram considerados os esforços provenientes do peso próprio da torre.

Em uma análise transiente, é determinada a resposta dinâmica da torre de sustentação do aerogerador, sob a ação de um carregamento harmônico. No presente trabalho foi aplicado um carregamento modelado como um espectro de potência de Davenport utilizado no trabalho de Shzu et al. (2015). Esta excitação dinâmica imposta à estrutura foi modelada para simular a ação da força resultante que o vento exerce sobre a torre do aerogerador. Nesta análise transiente, o tempo total de análise foi de 15 segundos e um passo de tempo de 0.1 segundos. Assim como nos modelos anteriores, foi utilizado o algoritmo de otimização de primeira ordem do ANSYS R13.0. O problema de otimização nesta análise transiente, pode ser representado pelas equações apresentadas a seguir.

Volume da torre como função objetivo definida por:

$$\text{volume}(x) = \sum_{j=1} AL \quad (63)$$

Onde:

L: altura da torre.

A: área de seção tubular transversal.

As variáveis de projetos utilizadas nesta análise foram os raios internos e externos da base e do topo da torre. Quanto as restrições consideradas neste problema de minimização do volume, foram consideradas as mesmas restrições mecânicas de desigualdade apresentadas no problema de otimização em regime estático:

4. Restrição de deslocamento horizontal no topo da torre.

$$\delta < \delta_{\text{Max}} \quad (64)$$

No qual:

δ : Deslocamento no topo da torre.

δ_{Max} : Deslocamento máximo horizontal admissível.

A restrição de deslocamento máximo foi modelada de acordo com as recomendações da norma europeia Eurocode 3 (2004). Esta norma recomenda que o deslocamento horizontal máximo no topo da torre não seja superior ao calculado pela eq. (65).

$$\delta_{\text{Max}} = \frac{L}{50} = 1.2 \text{ m} \quad (65)$$

Onde:

δ_{Max} : deslocamento máximo recomendado pela norma Eurocode 3.

L: altura da torre.

5. Restrição relativa a tensão máxima equivalente, que inclui todas as tensões multidirecionais. A restrição relativa a tensão equivalente máxima é representada pela eq. (66).

$$\sigma \leq \sigma_{\text{Max}} \quad (66)$$

Onde,

σ : tensão máxima de von Mises.

σ_{Max} : tensão admissível.

Deste modo, este terceiro modelo numérico de otimização busca:

Minimizar a função volume:

$$\text{Volume}(x) = \sum_{j=1} AL \quad (67)$$

Submetidas as restrições:

$$\delta < \delta_{\text{Max}} \quad (68)$$

$$\sigma \leq \sigma_{\text{Max}} \quad (69)$$

$$\mathbf{e} \geq \mathbf{e}_{\text{min}} \quad (70)$$

$$X_i \leq X \leq X_S \quad (71)$$

Sendo o X vetor que contem ás variáveis de projeto, e X_i e X_S são respectivamente os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto.

5.8.2 Aplicação da otimização

Neste problema de otimização em regime transiente, a torre eólica foi modelada como elemento de viga, submetida a um carregamento modelado como espectro de potência de Davenport. Neste modelo numérico, foram impostas restrições mecânicas de desigualdade e os limites inferiores e superiores, para as variáveis de projeto para delimitar o domínio de variação destas variáveis, foram os mesmos adotados na análise estática linear.

São apresentados, na Tabela (27), os resultados para os raios externos fixados em 2m para a análise transiente.

Tabela 27: Variáveis de Projeto, valores para os raios externos fixados em 2m.

Variável	Valor
Espessura da base	0.005m
Espessura do topo	0.005 m
Raio interno da base	1.9950 m
Raio interno do topo	1.9950 m

Tabela 28: Restrições de projeto, valores para os raios externos fixados em 1,5m.

Restrição	Valor
σ (Mpa)	270.181
δ (m)	$3.177 \cdot 10^{-3}$

Tabela 29: Restrições de projeto, valores para os raios externos fixados em 2m.

Restrição	Valor
σ (Mpa)	101.01
δ (m)	$2.459 \cdot 10^{-3}$

Tabela 30: Função objetivo, valores para os raios externos fixados em 1,5m.

Função Objetivo	Valor
Volume(x)	$8.4395 m^3$

Tabela 31: Função objetivo, valores para os raios externos fixados em 2m.

Função Objetivo	Valor
Volume(x)	$3.7650 m^3$

Neste exemplo numérico, durante o processo de otimização foram realizadas cinco iterações (*sets*), e o resultado ótimo da função objetivo foi obtido na quarta iteração. O resultado ótimo obtido para função objetivo equivale a 55,3% do volume inicial da torre com raio externo de 1,5 m.

Na quarta iteração, onde foi alcançado o resultado ótimo para função objetivo, a tensão atingiu 101,01 Mpa, representando 49.5% do limite superior imposto para este parâmetro. A restrição de deslocamento máximo horizontal, atingiu o valor de $2.459 \cdot 10^{-3}$ m. Assim como na análise estática, o deslocamento máximo horizontal, apresentou significativo distanciamento do limite superior 1.2 m calculado de acordo com as recomendações do Eurocode 3.

O gráfico da Figura (30) permite comparar o deslocamento horizontal no topo da torre do projeto inicial e do projeto de torre otimizado.

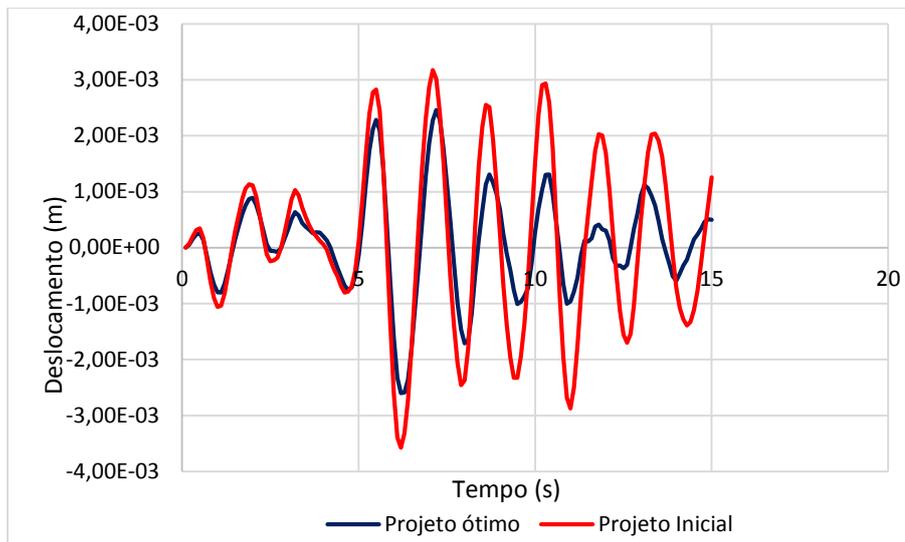


Figura 29: Deslocamento em Função do tempo para o projeto de torre inicial e projeto de torre otimizado

A comparação entre os dois gráficos permite perceber uma diferença na amplitude dos deslocamentos horizontais do projeto inicial e do projeto ótimo. Ainda que em ambos os projetos a ordem de grandeza da amplitude do deslocamento, seja igual, no projeto otimizado ocorreu uma diminuição na amplitude do deslocamento horizontal no topo da torre.

5.9 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CONTROLE ESTRUTURAL NA OTIMIZAÇÃO

5.9.1 Descrição do problema

Nesta seção foi avaliada a influência da aplicação de um sistema de controle estrutural pendular, conectado a torre de sustentação do aerogerador. O pêndulo é um dispositivo composto por um sistema massa, mola e amortecedor conectado a estrutura do aerogerador com o objetivo de reduzir a respostas das vibrações na estrutura (Soong e Dargush, 1997). O início da utilização de sistemas de controle estrutural, para o controle de estruturas civis, iniciou-se por volta da década de 60 com o controle de estruturas altas e esbeltas como edifícios, torres e chaminés industriais. Os sistemas de controle estrutural na forma de pêndulo reduzem significativamente a resposta da estrutura associada ao primeiro modo de vibração e podem aumentar as respostas associadas aos modos de vibração mais elevados (Carneiro et all, 2008).

Neste trabalho, estudou-se como o sistema de controle estrutural conectado a torres de sustentação do aerogerador influenciaria no processo de otimização. O pêndulo conectado a estrutura da torre busca reduzir a demanda de dissipação de energia nos membros estruturais sob a ação de forças externas (Lima, 2007). O pêndulo conectado a estrutura promove uma alteração nas propriedades de amortecimento e rigidez da estrutura Avila (2002).

5.9.2 Obtenção dos parâmetros do pêndulo

Apesar do conceito do pêndulo ser simples, os parâmetros de massa, rigidez e amortecimento do dispositivo devem ser obtidos por meio de procedimentos adequados de projeto, que permitam atingir um melhor desempenho e efetividade no controle da estrutura em estudo (Lima, 2007). Den Hartog (1956), foi um dos pioneiros na obtenção de expressões matemáticas para a determinação dos parâmetros ótimos para sistemas de controle para estruturas não amortecidas submetidas excitações dinâmicas.

Os parâmetros ótimos de projeto do pêndulo utilizados neste trabalho, foram obtidos a partir do trabalho de Shzu et all. (2015), que foram calculados por meio do procedimento de otimização paramétrica com o método MinMax sugeridos no trabalho de Oliveira et all. (2014). Os parâmetros de projeto ótimos do pêndulo obtidos por Shzu et all (2015), são apresentados na Tabela (32).

Tabela 32: Parâmetros de projeto do pêndulo.

Parâmetros	Valor
Razão de Massa	$\mu = 0.06$
Massa do Pêndulo	$M_p = 9198.6 \text{ Kg}$
Rigidez do Pêndulo	$K_p = 1247900 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Comprimento do Pêndulo	$L = 4.0 \text{ m}$
Amortecimento Pêndulo	$C_p = 9024.9 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}$

5.9.3 Modelagem do Pêndulo

No *software* ANSYS R13.0, o pêndulo foi modelado com os elementos BEAM4, MASS21 e COMBIN14, presentes na biblioteca do ANSYS R13.0. O pêndulo foi modelado como um elemento de viga de Euler-Bernoulli por meio do elemento BEAM4 com um elemento de massa modelado via MASS21, conectado a extremidade da viga. O elemento COMBIN14 foi utilizado duas vezes na modelagem do problema de controle estrutural, a primeira representando as propriedades de rigidez estrutural do sistema, e em seu segundo uso, foi utilizado para representar uma mola tridimensional, que caracteriza a rigidez torsional que conecta a torre ao pêndulo por meio do comando CP do ANSYS (Shzu et all, 2015).

5.9.4 Análise da Influência do Pêndulo no processo de otimização

Neste problema partindo-se do projeto inicial da torre, conectou-se o pêndulo na torre e executou-se novamente as análises estruturais em regime transiente e o processo de otimização, para verificar como os resultados ótimos seriam afetados pelo sistema de controle conectado a estrutura da torre. As propriedades geométricas, físicas, carregamentos, assim como as variáveis e restrições de projeto, foram as mesmas utilizadas na análise transiente apresentada da seção anterior, no qual buscava-se a minimização do volume.

Na Tabela (33) é apresentado um novo volume inicial da torre considerando o volume adicionado pelo pêndulo conectado a torre. O pêndulo conectado a torre adiciona 0.28273 m^3 ao volume inicial da torre, volume este que será descontado no resultado final do volume da torre otimizada.

Tabela 33: Função objetivo valores do volume inicial e volume com pêndulo conectado.

Função Objetivo	Valor Inicial	Valor com pêndulo
Volume(x)	8.4395 m^3	8.7222 m^3

Os resultados obtidos no processo de otimização em regime transiente com o pêndulo conectado a estrutura da torre podem ser observados nas tabelas (34), (35) e (36).

Tabela 34: Variáveis de Projeto, valores iniciais e ótimos

Variável	Valor Inicial	Valor ótimo com pêndulo
Espessura da Base	0.015 m	0.006 m
Espessura do Topo	0.015 m	0.006 m
Raio externo da base	1.5 m	2 m
Raio externo do topo	1.5 m	2 m
Raio interno da base	1.485 m	1.9940 m
Raio interno do topo	1.485 m	1.9940 m

Tabela 35: Restrições de projeto, valores iniciais e ótimo.

Restrição	Valor Inicial	Valor ótimo com pêndulo
σ (Mpa)	270.181	190.002
δ (m)	$3.177 \cdot 10^{-3}$	$1.128 \cdot 10^{-6}$

Tabela 36: Função objetivo valores iniciais e ótimos

Função Objetivo	Valor Inicial	Valor ótimo com pêndulo
Volume(x)	8.7222 m^3	4.7812 m^3

No processo de otimização estrutural, a conexão de um pêndulo a estrutura da torre resultou em um resultado ótimo de torre com um volume 45.18% menor do que o projeto de torre original. Entretanto, volume final obtido com a conexão do pêndulo ainda é maior do que o volume final do projeto ótimo sem pêndulo. A Tabela (37), permite comparar o resultado do volume ótimo sem sistema de controle em relação ao volume ótimo com sistema de controle.

Tabela 37: Volume ótimo sem sistema de controle e com sistema de controle

Função Objetivo	Valor ótimo sem controle	Valor ótimo com controle
Volume(x)	3.7650 m ³	4.7812 m ³

Na Tabela (37) é possível constatar que o volume final obtido é melhor sem a conexão do sistema de controle a estrutura da torre, isso acontece pelo fato da massa concentrada na extremidade do pêndulo adicionar uma carga extra a estrutura da torre, aumentando assim as solicitações na estrutura, resultando em um aumento de tensão, implicando em um aumento da seção transversal da casca da torre.

Os gráficos das Figuras (31) e (32) permitem verificar os resultados para o deslocamento horizontal no topo da torre sem dispositivo de controle e compará-lo com o deslocamento horizontal com sistema de controle.

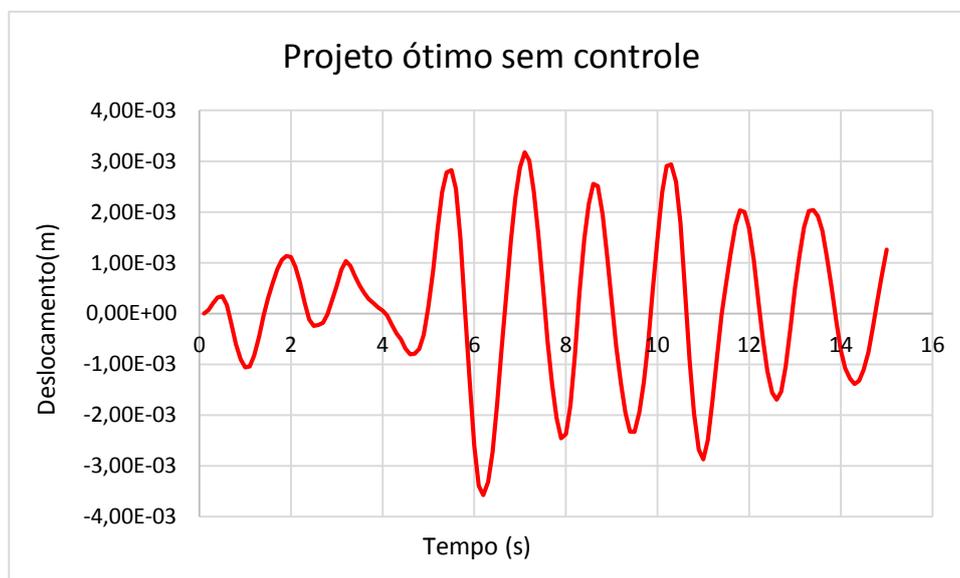


Figura 30: Projeto ótimo sem Controle

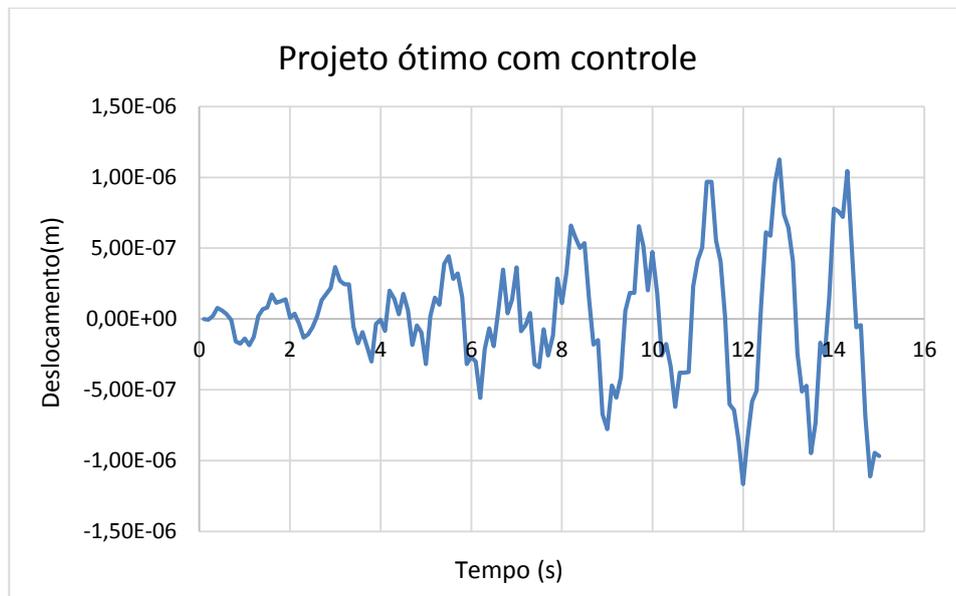


Figura 31: Projeto ótimo com controle

Os gráficos das Figuras (31) e (32) permitem comparar o deslocamento horizontal na extremidade da torre do projeto ótimo sem sistema de controle conectado a torre, em relação ao deslocamento horizontal do topo da torre com sistema de controle conectado a estrutura. A análise dos gráficos mostra uma redução de até 3 ordens de grandeza no deslocamento do projeto de torre ótimo com sistema de controle em relação ao projeto ótimo sem sistema de controle. Deste modo, verifica-se que a conexão do pêndulo a torre resultou em uma significativa redução do deslocamento horizontal no topo da torre.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho de conclusão de curso, analisou-se a influência de um sistema de controle conectado a estrutura de uma torre de sustentação de aerogerador no processo de otimização estrutural dessa torre no pacote computacional ANSYS R13.0. A torre foi modelada como elemento de viga e foram realizadas análises estáticas, modais e transientes e suas respectivas simulações de otimização.

No primeiro modelo numérico, foi realizada a análise estática, onde foi aplicado um carregamento de vento modelado de acordo com as recomendações da norma ABNT-NBR 6123. As restrições de projeto foram o deslocamento máximo horizontal na extremidade da torre, e a tensão admissível. Nesta análise obteve-se uma redução de 55,3% do volume da torre e os resultados ótimos para as restrições de projeto, apresentaram um significativo distanciamento em relação aos limites superiores impostos ao projeto.

No segundo modelo numérico, executou-se uma análise modal para realizar o processo de otimização da torre do aerogerador utilizando a frequência fundamental da estrutura como restrição de projeto. Deste modo, utilizou-se a frequência fundamental da torre inicial como limite inferior para restrição de projeto frequência, e a frequência de ressonância como limite superior. Os resultados do processo de otimização com a análise modal alcançaram o volume mínimo possível, isto é, o volume no qual a espessura mínima não seria violada. Todavia, ainda que o volume alcançado seja o menor possível, constatou-se que o uso da frequência isoladamente para o processo de otimização não é um parâmetro adequado para o projeto da torre, uma vez que permite um grande intervalo de variação das variáveis de projeto da torre.

O último modelo numérico realiza a análise da influência do sistema de controle no processo de otimização estrutural. O sistema de controle conectado a estrutura resulta em uma representativa diminuição do deslocamento horizontal na extremidade da torre de sustentação. Todavia, a conexão do pêndulo a torre resultou em um aumento das solicitações na estrutura da torre, devido a massa concentrada na extremidade do pêndulo. O resultado do aumento de tensão e implicou no aumento da área seção transversal da casca da torre e aumento do volume da torre em relação ao projeto ótimo sem o pêndulo.

Deste modo, conclui-se que no processo de otimização do aerogerador em estudo, a utilização do sistema de controle na forma de pêndulo conectado a estrutura, resulta em um deslocamento horizontal menor, entretanto, provocando um aumento do volume da torre em relação ao projeto ótimo inicial sem controle. Levando-se em consideração a segurança estrutural e o custo total do aerogerador, conclui-se que a conexão do sistema de controle é adequada no projeto estrutural da torre de sustentação do aerogerador, uma vez que o aumento do volume no projeto ótimo com sistema de controle é compensado pela redução do deslocamento total do aerogerador, implicando no aumento da segurança estrutural de todo o aerogerador.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6123, 1988, “Forças Devidas ao Vento em Edificações”, Rio de Janeiro, Brasil
- Ackermann, T; Lennart, S, 2002, “An Overview of Wind Energy-Status 2002” Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal, VOL. 6, Elsevier. pp. 67 - 128.
- ANSYS, 2012, “ANSYS 13.0 User’s Manual”, Estados Unidos da América.
- ANSYS, 2009,” ANSYS Theory Reference for Mechanical APDL and Mechanical Applications”, Estados Unidos da America.
- Arora, J, 1997,”Introduction to Optimum Design”, Elsevier, 2th Edition, San Diego.
- Avila, S. M., 2002,” Controle Híbrido para Atenuação de Vibrações em Edifícios” , Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Avila, S. M., 1997, “Análise Dinâmica de Estruturas Elásticas e Elastoplásticas com Amortecimento Não Proporcional, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Avila, S. M., Shzu, M. A. M, Pereira, W .M, Santos, L. S, Moraes, M. V. G, Prado, Z. J. G, 2013” Numerical Modeling of the Dynamic Behavior of a Wind Turbine Tower”, 11th International Conference On Vibration Problems – ICOVP, Lisbon, Portugal
- Basu, B; Colwell, S, 2009, “Tuned Liquid Column Dampers in Offshore Wind Turbines for Structural control” Engineering Structures Journal, Vol. 31, Elsevier, pp. 358 – 368.
- Bathe, K.J. & Wilson, E.L.,1976 “Numerical Methods in Finite Element Analysis, PrenticeHall Englewood Cliffs”, New Jersey.
- Blessmann. O, 1995 “ O Vento na Engenharia Estrutural”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Burton, T, 2001”Wind Energy Handbok” Wiley, New York
- Carneiro, R. B., Avila, S. M. and Brito, J. L. V., 2008, “Parametric study on multiple tuned mass dampers using interconnected masses”, International Journal of Structural Stability and Dynamics, VOL 8,pp.187-202.
- Carneiro, R. B, 2009, “Controle Semiativo de Vibrações em Estruturas Utilizando Amortecedor Magnetorreológico”, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE, 2012, “Avaliação e Percepções para o Desenvolvimento de uma Política de CT & I no Fomento da Energia Eólica no Brasil ”, Brasília, Brasil.
- Custódio, R. S, 2009, “Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica”, ELETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil.

- . Den Hartog, P. J, 1956, “ Mechanical vibrations” McGraw-Hill, 4th Edition., New York, United States.
- Dellezzopolles, C. F, 2011, “Análise Dinâmica de Torre de Energia Eólica” Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Dincer, F, 2011, “The Analysis on Wind Energy Electricity Generation Status, Potential and Policies in the World” Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal, VOL. 15, Elsevier. pp. 5135 - 5142.
- Dueñas, O, Basu, B, 2009, “Unavailability of Wind Turbines Due to Wind Induced Accelerations” Engineering Structures Journal, Vol. 30, Elsevier, pp. 885 – 893.
- ELETROBRAS, 2001, “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”, Brasília, Brasil.
- Eurocode 3-2, 2004, “Design of steel structures - Part 3-2: Towers, masts and chimneys”, European Union.
- Evolucaoalp, 2013, ”Aerogeradores de Eixo Vertical” Disponíveis em: <http://evolucaoalp.wordpress.com/category/evolucao-da-ciencia/> acesso em 15/06/2013
- Feijó,P. B, 2010,“Otimização de Torres de Aço para Geradores Eólicos” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil
- Fitzgerald, B; Basu, B; Nielsen S.R.K, 2013, “Active Tuned Mass Dampers for Control of in-plane Vibrations of Wind Turbines Blades”, Structural Control and Health Monitoring, Wiley Online Library.
- General Eletrics - GE, 2015, ” Fases da montagem de um aerogerador” Disponível em: <<http://www.gereportsbrasil.com.br/post/96000858299/voce-sabe-como-se-monta-um-aerogerador>> Acesso em 02/05/2015
- Gerges, G.G; Vickery, B.J, 2003, “Wind Tunnel Study of the Across-Wind Response of a Slender Tower with a Nonlinear Tuned Mass Damper” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, VOL. 91, Elsevier, pp. 1060 – 1092.
- Gunnar Britse, 1993, ”Wind Turbines Photos” Disponível em:<<http://www.windpowerphotos.com/Vk0303w/sidor/354-5403ksb.htm>>
- GWEC - Global Wind Energy Council, 2015, “Global Wind Report – Annual Market update 2014”. Bruxelas, Bélgica.
- Hansen, M.O.L; Sorensen, J.N; Voutsinas, S; Sorensen, N, 2006, “State of the Art in Wind Turbine Aerodynamics and Aeroelasticity” Progress in Aerospace Sciences, VOL. 42, Elsevier, pp. 385 – 330.
- Hibbeler, R.C. 2004, “Resistencia dos Materiais” Pearson Prentice Hall, São Paulo.
- Iammadein,2015“Dutch Windmills” Disponível em:<<http://www.iammadein.com/blog/about-the-netherlands-2/> acesso em 23/05/2015>

- Karimi, H.R; Zapatero, M; Ningsu, L, 2010, “Semiactive Vibration Control of Offshore Wind Turbines Towers with Tuned Liquid Column Dampers Using H_∞ Output Feedback control”, IEEE International Conference on Control Applications, Yokohama, Japão.
- Lackner, M.A; Rotea, M.A, 2010, “Passive Structural Control of Offshore Wind Turbines” Wind Energy Journal, Wiley Interscience, VOL. 14, pp. 373 – 378.
- Laks, J.H, Pao L.Y, Wright A.D, 2010, “Control of Wind Turbines: Past, Present and Future”, American Control Conference, Missouri, United States.
- Lima, J. B. C. A, 2011, ”Contribuições para Otimização Estrutural de torres Tubulares de Aço para Turbina Eólica” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- Lima, D. V. F, 2007, “Controle de Vibrações Induzidas em uma laje de academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- Lunar, 2015”Torre Eólica Estaiada” Disponível em: <<http://lunar.thegamez.net/greenenergyimage/wind-generator-tower/wind-power-generator-guy-wire-tower-55m-30m-buy-guy-wire-tower-for-598x800.jpg>> Acesso em 02/05/2015
- Katu, 2013, ”Colapso de aerogerador nos Estados Unidos da América”, Disponível em: <<http://www.katu.com/news/local/9383316.html>> Acesso em: 21/06/2013
- Marinho. J. P, 2002, “ Projeto Ótimo de Estruturas Metálicas de Arquibancadas reutilizáveis”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Ministério de Minas e Energia – MME, 2010, “Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica – Proinfa” Acesso em 14/05/2013
Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>>
- Morais, M.V.G; Barcelos, M; Avila, S.M; Shzu, M.A.M; Silva, R.C, 2009, “ Dynamic Behavior Analysis of Wind Turbine Tower”, Congresso de Métodos Numéricos em Ingeniería, SEMNI.
- Menin, R. C. G; Taylor.W; Menin, E. C. G; Lopes, A. P, 2007 ” Algoritmos de Conservação ou Decremento da Energia na Análise Dinâmica Não-Linear De Estruturas” CILAMCE 2007- Ibero -Latin American Congress on Computational Methods in Engineering.
- Murtagh, P. J ; Ghosh, A; Basu, B; Broderick, M, 2007, “ Passive Control of Wind Turbines Vibrations including Blade/Tower Interaction and Rotationally Sample Turbulence”, Wind Energy Journal, Wiley Interscience, VOL. 11, pp. 305 – 317.
- Negm. H.M; Maalawi K.Y. 2000,”Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers”, Computers and Structures. VOL 74,pp. 649 – 666.
- Oliveira, F. S, 2012” Critérios de Projeto para Amortecedor Tipo Pêndulo para Controle de Vibrações em Edifícios Altos.”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal.

- Oliveira, F. S; Gomez, A. L. Z; Avila, S. M; Brito J. L. V, 2014” Design Criteria for a Pendulum Absorber to Control High Building Vibrations”, International Journal of Innovations in Materials Science and Engineering (IMSE), VOL. 1, NO. 2
- Paula, R. L, 2012, “Modelo Acoplado Torre- Aerogerador de Eixo Horizontal”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.
- Perelmuter, A; Yurchenko V, 2013, “Parametric Optimization of Steel Shell Towers of High-Power Wind Turbines”, Procedia Engineering Journal, Vol. 57, Elsevier, pp. 895 – 905.
- Quilligan, A; O’Connor, A; Pakrashi, V, 2012, “Fragility Analysis of Steel and Concrete Wind Turbines Towers”, Engineering Structures Journal, Vol. 38, Elsevier, pp. 270 – 282.
- Roffel, A. J; Narasimhan, S; Haskett, T, 2012 “Performance of Pendulum Tuned Mass Dampers in Reducing the Response of Flexible Structure” Journal of Structural Engineering, ASCE.
- Santos, N. A. A. S, 2013, “Otimização de Torre de Aço para Aerogerador Eólico” Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
- Silva, E.C.N, 2005”Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos”, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.
- Silva, M.A; Brasil, R; Arora, J, 2008,” Formulations for the Optimal Design of RC Wind Turbine Towers”, EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro.
- Shzu M. A. M; Morais, M. V. G; del Prado, Z. J. G; Avila S. M, 2015 “Finite Element Analysis of a Wind Turbine Tower with a Pendulum Tuned Mass Damper”, DINAME 2015 - Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, ABCM, Natal , Brazil.
- Soong, T. T; Dargush, G, F, 1997, “Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering”, Chichester, John Wiley & Son.
- Spera, D. A, 2009, “Wind Turbine Technology”, ASME, Second Edition, New York, United States.
- Stewart, G. M, 2012, “Load Reduction of Floating Wind Turbines Using Tuned Mass Dampers” Master Thesis, University of Massachusetts, Massachusetts, United States.
- Sway Turbines, 2012, “ST10 Sway Wind Turbine”, Acesso em 04/06/2013
Disponível em: <<http://www.windpowermonthly.com/article/1155881/close---sway-turbines-st10-10mw-turbine>>
- Tolmasquim, T. M, 2011, “Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro”, Editora Sinergia, São Paulo.

Tsouroukdissian, A. R, 2011 “Wind Turbine Tower Load Reduction Using Passive and Semi-Active Dampers” European Wind Energy Association -EWEA Conference, Brussels.

Turku Energia, 2009 “Raposaren Wind Turbine”, Disponível em:
<<http://www.industcards.com/wind-finland.htm>>

Uys. P.E; Farkas. J; Jarmai. K; Van Tonder. F, 2007, “Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure””, Engineering Structures Journal, Vol. 29, Elsevier, pp. 1337 – 1342.

Wei Tong, 2010, “Wind Power Generation and Wind Turbine Design”, WIT Press, Miami, United States.

Yalla, S. K; Kareem, K; Kantor, J.C, 2001, “Semi-active Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Structures” Engineering Structures Journal, Vol. 23, Elsevier, pp. 1469 – 1479.

Wilson, L; Bathe, K.J,1976 ” Numerical methods in finite element analysis”,Prentice-Hall

Zuluaga, A. L. G, 2007, “Controle de Vibrações em Edifícios submetidos a cargas dinâmicas Utilizando Amortecedor de Massa Sintonizado na forma de Pêndulo”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal.