

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**BRUNO PINHO FEIJÓ**

**OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE AÇO PARA GERADORES EÓLICOS**

Fortaleza

2010

**BRUNO PINHO FELJÓ**

**OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE AÇO PARA GERADORES EÓLICOS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. D.Sc. Antônio Macário Cartaxo de Melo

Co-Orientador: Prof. D.Sc. Evandro Parente Junior

Fortaleza

2010

**BRUNO PINHO FELJÓ**

**OTIMIZAÇÃO DE TORRES DE AÇO PARA GERADORES EÓLICOS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia Civil.

Aprovada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Antônio Macário Cartaxo de Melo (Orientador), D. Sc.  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Evandro Parente Júnior (Co-Orientador), D. Sc.  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof<sup>a</sup>. Silvana Maria Bastos Afonso da Silva, Ph. D.

---

Prof. Augusto Teixeira de Albuquerque, D. Sc.

*A minha esposa **Carla**, por todo o incentivo e compreensão durante estes anos de estudo.*

*Aos meus Pais, **Valber e Núbia**, por todo o amor, carinho, e apoio concedido durante toda minha vida*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Antônio Macário Cartaxo de Melo, pela sabedoria, orientação e ensinamentos transmitidos durante todo o curso, principalmente na execução desta dissertação.

A todos os professores do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFC, em especial ao Prof. Evandro Parente Junior, pela co-orientação na dissertação e pelas ajudas prestadas durante todas as atividades do mestrado.

Aos meus irmãos, que direta ou indiretamente me apoiaram e me incentivaram neste mestrado.

Aos amigos da turma do curso de mestrado, em especial os da área de Estruturas (Bruno Barros, Paulo Filho, Fábio Anderson, Rafael Fernandes), pelas ajudas prestadas, pelas noites de estudos compartilhadas e pelo companheirismo e incentivo nos momentos mais difíceis.

À FUNCAP e a CAPES pelo financiamento desta pesquisa.

Aos meus pais, por toda a educação e estudo que eles me proporcionaram, sem os quais, esta dissertação não seria possível.

A minha esposa Carla, por todo o amor e companheirismo dedicado; pela compreensão nos momentos de ausência; e principalmente por ser a maior incentivadora neste mestrado.

## RESUMO

Diversas formas de geração de energia vêm sendo desenvolvidas com o intuito de oferecer alternativas ecologicamente corretas. Na região Nordeste do Brasil e principalmente no Estado do Ceará, a energia eólica vem se destacando devido ao grande potencial dos ventos da região. Para aumentar a potência gerada, torres cada vez mais altas têm sido usadas em busca de ventos mais fortes. Vale ressaltar que o custo das torres, geralmente fabricados em aço, representa parcela importante (20 a 30%) do custo total do sistema de geração eólico. Este trabalho apresenta duas formulações para a otimização do projeto de torres tubulares para geradores eólicos de aço. A primeira considera uma torre de aço cilíndrica prismática, onde foi modelada segundo a teoria de viga clássica de Euler-Bernoulli. A segunda formulação considera uma torre, composta de segmentos de troncos de cone, onde foram utilizados para análise por elementos finitos clássicos de pórtico plano. As variáveis de projeto que definem as estruturas são os diâmetros representativos dos segmentos e as suas espessuras. Na torre cilíndrica este diâmetro é único. O custo mínimo é procurado minimizando-se o peso da torre. As restrições dizem respeito ao comportamento estrutural (rigidez, resistência e estabilidade de acordo com recomendações de normas) e ao processo de fabricação e transporte. O processo de fabricação confere aos diâmetros representativos de cada segmento uma natureza contínua, e em consequência da disponibilidade comercial, as espessuras das chapas possuem natureza discreta. As restrições relativas à verificação da segurança segundo as normas apresentam pontos com descontinuidades nas funções e nas suas derivadas. Estes dois aspectos, que dificultam a solução do problema pelos métodos clássicos de Programação Matemática, têm sido adequadamente tratados por algoritmos baseados na simulação do processo de evolução de Darwin e em princípios da genética, os chamados Algoritmos Genéticos (AG's). Assim, algumas aplicações da formulação são feitas e soluções são obtidas usando AG's. Os resultados obtidos são comparados com soluções da literatura e soluções ótimas são verificadas por meios de modelos de elementos finitos de cascas usando o software ABAQUS.

**Palavras-chave:** Otimização Estrutural; Torre Tubular; Computação Evolucionária.

## ABSTRACT

Different forms of energy generation have been developed with the intention of offering environmentally friendly alternatives. In the Northeast region of Brazil and especially in the state of Ceará, wind energy has been increasing due to the large potential of wind in the region. To increase the power, increasingly high towers have been used to capture stronger winds. It is noteworthy that the cost of towers, generally made of steel, represents significant portion (20-30%) of the total wind power generation system costs. This work presents two approaches for optimizing the design of tubular towers for wind steel generators. The first considers a prismatic cylindrical steel tower, which is modeled by means of the classical Euler-Bernoulli's beam theory. The second formulation considers a tower composed of segments of the trunks of cone. The analysis was run by finite element analysis. The design variables that define the structures are the diameters of representative segments and their thicknesses. In the prismatic cylindrical tower, this diameter is unique. The minimum cost is searched by minimizing the weight of the tower. Constraints related to the structural behavior (stiffness, strength and stability in accordance with recommendations of standards) and the manufacturing process and transportation are considered. The manufacturing process gives the diameters of each segment representing a continuous nature, and as a result of commercial availability, the thicknesses of the plates have a discrete nature. The constraints to ensure the safety of the structure followed the standards recommendations. They presented discontinuities in their functions and their derivatives. The discrete nature and the discontinuities hinder the solution of the problem by classical methods of mathematical programming. So, they had been adequately addressed by algorithms based on simulation of the process of Darwinian evolution and principles of genetics, called Genetic Algorithms (GA). Thus, some applications of the formulation are made and solutions are obtained using GA's. The results are compared with solutions from literature, and the optimum solutions obtained are verified by shell finite elements models using the software ABAQUS.

**Keywords:** Structural optimization; Tubular Tower; Evolutionary Algorithms.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Potência instalada no planeta nos últimos anos (MW) (CRESESB, 2010).</i>	12
<i>Figura 2 – Mapa do potencial eólico brasileiro. Fonte: (CEPEL, 2001)</i>	13
<i>Figura 3 – Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005 (CRESESB, 2010)</i>	21
<i>Figura 4 – Aerogeradores de eixo vertical (LAYTON, 2010)</i>	21
<i>Figura 5 – Esquema de um aerogerador de eixo horizontal (ANEEL, 2001)</i>	22
<i>Figura 6 – Transporte de um segmento tubular de uma torre eólica (VILARFORMOSO, 2010)</i>	25
<i>Figura 7 – Montagem de uma torre eólica tubular (VIEIRA, 2010)</i>	25
<i>Figura 8 – Torre eólica treliçada (OTDS, 2010)</i>	26
<i>Figura 9 – Torre eólica estaiada (GARY, 2010)</i>	27
<i>Figura 10 – Modelo de Viga</i>	29
<i>Figura 11 – Modelo de carga unitária</i>	43
<i>Figura 12 – Elemento pórtico plano (sistema local)</i>	44
<i>Figura 13 – Pressão característica do vento no modelo de elementos finitos</i>	45
<i>Figura 14 – Cargas atuantes no modelo de elementos finitos</i>	45
<i>Figura 15 - Projeto convencional versus projeto ótimo (ARORA, 1997).</i>	47
<i>Figura 16 – Representação binária de uma solução</i>	49
<i>Figura 17 – Tipos de Cruzamentos</i>	52
<i>Figura 18 – Modelo de viga (Otimização)</i>	55
<i>Figura 19 – Gráfico de uma função degrau</i>	60
<i>Figura 20 – Modelo da torre tronco de cone (Otimização)</i>	62
<i>Figura 21 – Modelagem da solução ótima da Torre Tronco de Cone 1 em elementos de casca.</i>	74
<i>Figura 22 – Modelagem da solução ótima da Torre Tronco de Cone 2 em elementos de casca.</i>	76
<i>Figura 23 - Modelagem da solução ótima da Torre Tronco de Cone 3 em elementos de casca.</i>	79

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Parâmetros Meteorológicos (NBR 6123, 1988)</i>	31
<i>Tabela 2 – Fator <math>S_2</math></i>	32
<i>Tabela 3 – Coeficiente de Arrasto <math>C_a</math> (NBR 6123, 1988)</i>	33
<i>Tabela 4 – Ações permanentes diretas consideradas separadamente (NBR 8681, 2003)</i>	36
<i>Tabela 5 – Ações permanentes diretas agrupadas (NBR 8681, 2003)</i>	37
<i>Tabela 6 – Ações variáveis consideradas separadamente</i>	37
<i>Tabela 7 – Ações variáveis consideradas conjuntamente</i>	38
<i>Tabela 8 – Valores dos coeficientes das ponderações (NBR 8800, 2008)</i>	38
<i>Tabela 9 – Espessuras das Chapas</i>	59
<i>Tabela 10 – Dados gerais utilizados nas aplicações</i>	69
<i>Tabela 11 – Dados da torre cilíndrica</i>	69
<i>Tabela 12 - Parâmetros do carregamento do vento</i>	69
<i>Tabela 13 - Resultados da ação do vento</i>	70
<i>Tabela 14 – Parâmetros do Algoritmo Genético</i>	70
<i>Tabela 15 – Resultados – Torre cilíndrica</i>	71
<i>Tabela 16 – Restrições – Torre cilíndrica</i>	71
<i>Tabela 17 – Dados da torre tronco de cone 1</i>	72
<i>Tabela 18 – Resultados da Torre Tronco de Cone 1</i>	73
<i>Tabela 19 – Restrições da Torre Tronco de Cone 1</i>	73
<i>Tabela 20 – Dados da torre cilíndrica</i>	74
<i>Tabela 21 – Resultados obtidos para a torre tronco de cone 2.</i>	75
<i>Tabela 22 – Restrições - Torre tronco de cone 2.</i>	75
<i>Tabela 23 – Dados da torre cilíndrica</i>	77
<i>Tabela 24 - Parâmetros do carregamento do vento</i>	77
<i>Tabela 25 - Resultados das ações dos ventos</i>	77
<i>Tabela 26 – Resultados obtidos para a torre tronco de cone 3.</i>	78
<i>Tabela 27 – Restrições - Torre tronco de cone 3.</i>	78

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Justificativa e importância do tema	11
1.2	Histórico	15
1.3	Objetivo	18
1.4	Estrutura do trabalho	19
<b>2</b>	<b>TORRES PARA GERADORES EÓLICOS</b>	<b>20</b>
2.1	Geradores eólicos	20
2.2	Torres	24
<b>3</b>	<b>ANÁLISE E VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA</b>	<b>28</b>
3.1	Modelo de vigas	28
3.1.1	Análise	28
1.1.1.1	Ação do Vento	29
3.1.2	Esforços Internos	34
3.1.3	Verificações de Segurança	34
3.1.3.1	Coefficientes de Ponderação	35
3.1.3.2	Força axial resistente de cálculo	38
3.1.3.3	Fator de redução total associado à flambagem local	39
3.1.3.4	Momento fletor resistente de cálculo	40
3.1.3.5	Força Cortante Resistente de Cálculo	41
3.1.3.6	Deslocamento no Topo	42
3.2	Modelo de elementos finitos	43
3.2.1	Análise e dimensionamento	44
3.2.2	Verificações de Segurança	45
<b>4</b>	<b>OTIMIZAÇÃO</b>	<b>46</b>
4.1	Formulação Matemática	46
4.2	Algoritmos Genéticos	48
4.2.1	- Conceitos básicos de Algoritmos Genéticos	50
<b>5</b>	<b>MODELOS DE OTIMIZAÇÃO</b>	<b>54</b>
5.1	Modelo da torre cilíndrica	54

5.1.1	Implementação .....	58
<b>5.2</b>	<b>Modelo da torre tronco de cone .....</b>	<b>61</b>
5.2.1	Implementação .....	66
<b>6</b>	<b><i>APLICAÇÕES</i> .....</b>	<b>68</b>
<b>6.1</b>	<b>Modelo da torre cilíndrica .....</b>	<b>68</b>
<b>6.2</b>	<b>ModeloS das torres troncos de cone.....</b>	<b>72</b>
6.2.1	Torre Tronco de Cone 1 .....	72
6.2.2	Torre Tronco de Cone 2 .....	74
6.2.3	Torre Tronco de Cone 3 .....	76
<b>7</b>	<b><i>CONCLUSÃO</i> .....</b>	<b>80</b>
<b>7.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b><i>BIBLIOGRAFIA</i> .....</b>	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

É notório que o planeta está sofrendo as conseqüências de anos de desenvolvimento desordenado e irresponsável. Porém, a cada dia aumenta a consciência ambiental, tanto dos governantes como da população mundial. Assim, as leis sócio-ambientais vêm ficando mais exigentes, forçando o desenvolvimento de novas tecnologias que substituam as já existentes que não se enquadram na nova conjuntura ambiental. Além do exposto, somam-se as oscilações com freqüentes altas dos preços dos produtos derivados de petróleo e o protocolo mundial firmado para a redução do nível de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Protocolo de Kyoto).

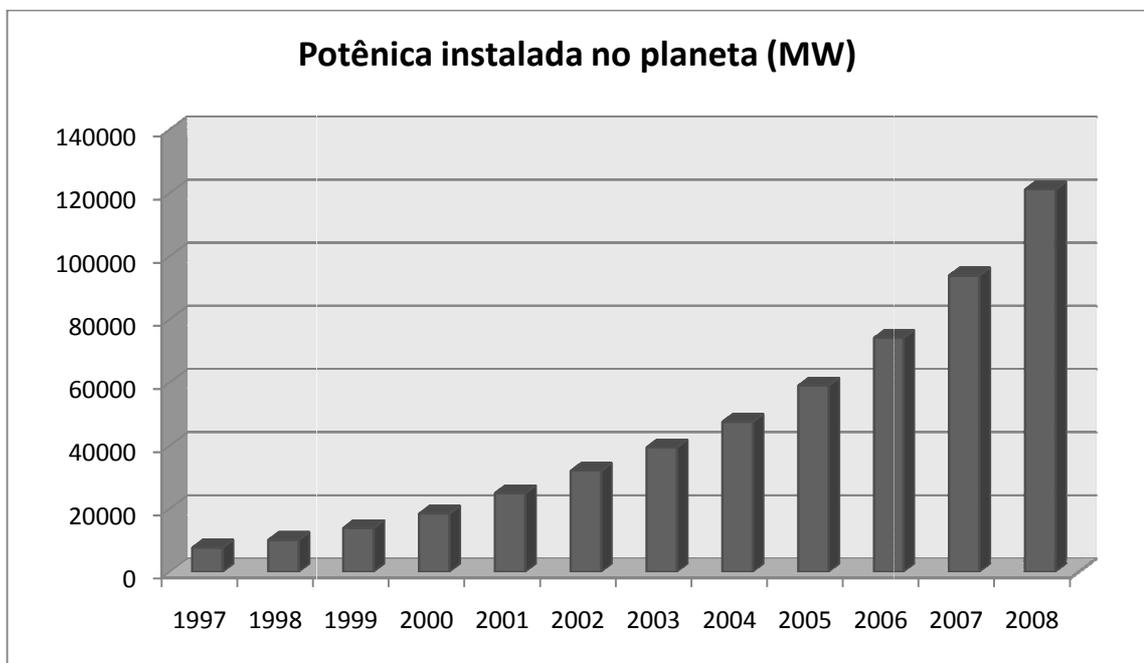
No contexto energético, diversas formas de energias vêm sendo desenvolvidas com o intuito de oferecer um desenvolvimento sustentável. Isso quer dizer, um desenvolvimento com um consumo consciente, preservando o meio ambiente, utilizando fontes naturais renováveis, sendo capaz de suprir as necessidades desta e de futuras gerações. Pode-se citar como exemplo a energia fotovoltaica (solar), a energia das marés e a energia eólica. Essas energias são denominadas de “Energias Verdes”.

Dentre as formas de “energias verdes”, a energia eólica vem se destacando no Brasil, principalmente no Ceará. A energia eólica é produzida a partir do vento, que por sua vez é produzida explorando-se a energia cinética gerada pela migração das massas de ar provocada pelas diferentes temperaturas do planeta.

Dentre as vantagens da energia eólica podemos citar a renovabilidade, a perenidade, a grande disponibilidade e o custo zero para obtenção de suprimentos. Como desvantagem, temos o elevado custo, apesar de estar diminuindo à medida que novos projetos são instalados e novas tecnologias são desenvolvidas. Como exemplo, segundo a ANEEL (2008), no Brasil, em 2008 o custo da energia eólica era cerca de R\$ 230,00 por MWh, enquanto o da energia hidrelétrica estava em torno dos R\$ 100,00 por MWh, incluindo impostos.

Para que a energia eólica seja aproveitável, é necessário que sua densidade seja da ordem de  $500 \text{ W/m}^2$ , o que equivale a uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (GRUBB e MEYER, 1993). Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, apenas 13% da superfície terrestre apresentam ventos com essa magnitude, o que equivaleria a 500.000 TWh por ano. Mas devido a restrições sócio-ambientais apenas cerca de 10% desse potencial pode ser aproveitado. Mesmo assim, esses aproximados 50.000 TWh por ano, equivale a quatro vezes o consumo de energia elétrica do planeta.

A capacidade instalada mundial de energia eólica teve um aumento de 1.155% entre 1997 e 2007, passando de 7,5 mil para 93,8 mil MW (ANEEL, 2008). O gráfico da Figura 1 ilustra evolução da potência instalada de energia eólica no planeta nos últimos anos.



**Figura 1 – Potência instalada no planeta nos últimos anos (MW) (CRESESB, 2010).**

O potencial eólico brasileiro apresenta valores bastante consideráveis, apesar de haver divergências entre especialistas e instituições na estimativa desse potencial. Segundo a ANEEL (2001), o potencial eólico do Brasileiro é de 143 TW.

Em 2003, a ANEEL (2008) afirmava que havia apenas 22 MW de potência de energia eólica instalada no Brasil. Já em 2008, essa potência era de 273 MW, apresentando um crescimento nos últimos cinco anos a uma taxa média anual de 65%. Todo esse crescimento não se deu apenas em termos de números de unidades de geradores eólicos, mas também em termos de capacidade destes geradores. Como referência, a primeira usina eólica

instalada no País, em Fernando de Noronha, possuía um gerador de 75KW em uma torre de 23 m de altura e um rotor de 17 m de diâmetro. As turbinas que são instaladas hoje têm a capacidade de 2 MW de potência, em uma torre com 70 m de altura e diâmetro de rotor de 100 m (ANEEL, 2008)

Em 2003, o Governo Brasileiro implantou o PROINFA, um programa nacional de estímulo à produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis (pequenas centrais elétricas, usinas eólicas, usinas de pequeno porte de biomassa). Inicialmente, o programa previa a instalação total de 3,3 mil MW, cabendo à energia eólica 1,4 mil MW, através da instalação de 54 usinas. A meta do PROINFA é que em 2022, essas três fontes de energia correspondam a 10% da matriz energética nacional.

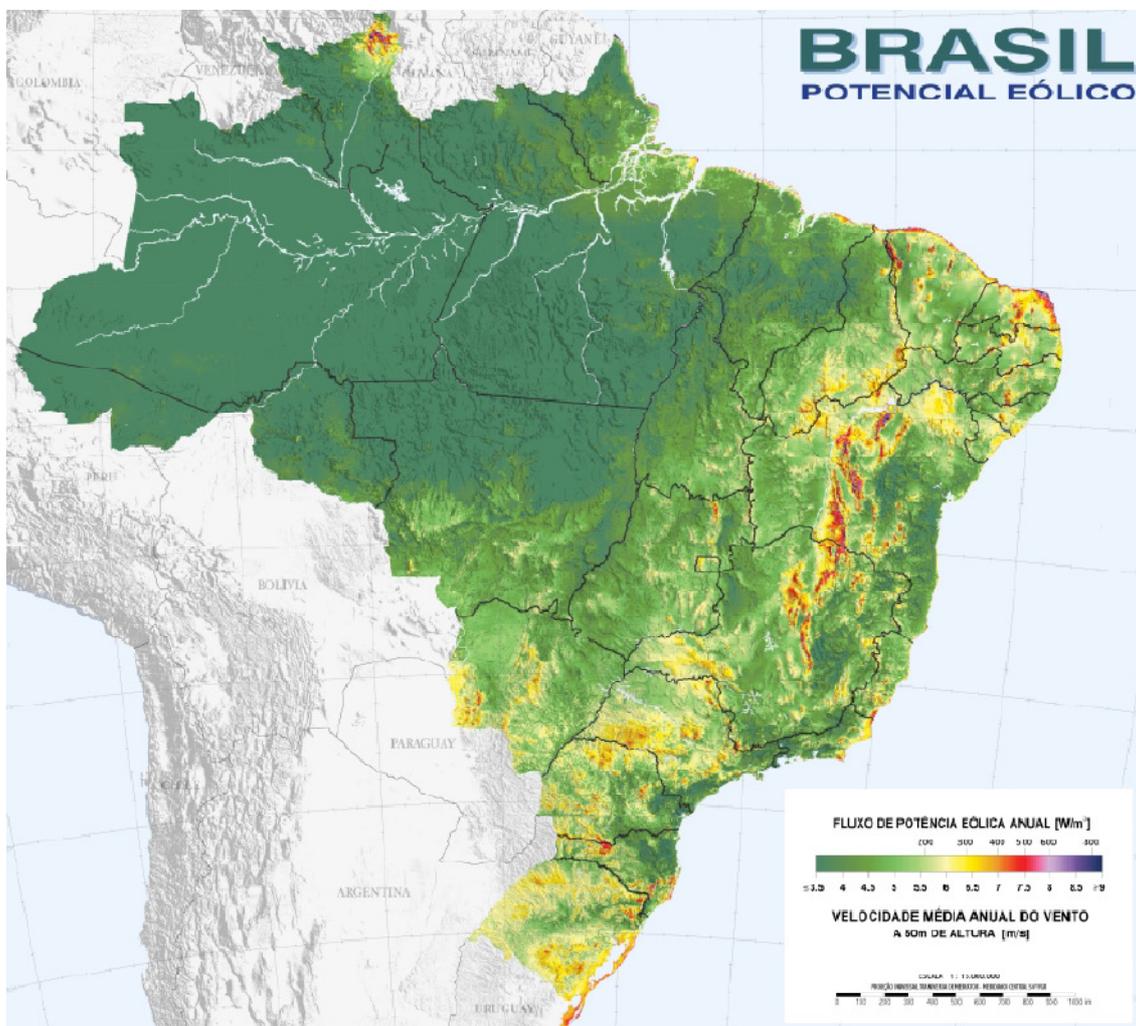


Figura 2 – Mapa do potencial eólico brasileiro. Fonte: (CEPEL, 2001)

Contudo, em outubro de 2008, estavam operando comercialmente apenas 7 usinas eólicas. Isso se deu devido à alta dependência de importações de equipamentos para a montagem das usinas, além da exigência do PROINFA de que os projetos tivessem índice de nacionalização de 60%.

De acordo com o BANCO DE INFORMAÇÃO GERAL - BIG (ANEEL, 2009), em abril de 2009, o Brasil tinha 2.073 empreendimentos em operação, gerando 106.354.015 KW de potência de energia elétrica. Destes empreendimentos apenas 33 são de energia eólica, correspondendo 414.480 KW, o que equivale a 0,39% da potência instalada nacional. Já os empreendimentos em construção, somam 7 usinas eólicas com potência outorgada total de 339.500 KW. Importante salientar é a quantidade de empreendimentos já outorgados, mas ainda não iniciadas as construções, que são no total de 50, correspondendo a 2.388.173 KW.

Quanto ao estado do Ceará, em abril de 2009 estavam instalados 28 empreendimentos de energia elétrica, gerando 834.850 kW de potência. Destes, 9 são de energia eólica, com uma potência total instalada de 121.830 kW, correspondendo a 14,59%. Em construção existiam 7 usinas correspondendo a 339.500 kW. E os empreendimentos outorgados e não iniciadas a construção somavam-se outras 7 usinas, correspondendo a 645.900 kW.

Existem dois fatores que fazem com que o estado do Ceará esteja recebendo todo esse investimento em energia eólica. O primeiro, e certamente o de maior relevância, é a posição geográfica do estado, possuindo uma vasta extensão de litoral com ventos com intensidade favoráveis para esse tipo de geração de energia, conforme pode ser verificado na Figura 2. O segundo é que no período do ano em que os níveis dos reservatórios da Região Nordeste estão baixos é a época em que os ventos são de maiores intensidades. Assim sendo, uma forma de energia complementa a outra.

Com esse grande aumento da produção mundial nos últimos anos, os equipamentos de geração de energia eólica (aerogeradores) também vêm sofrendo uma grande evolução, principalmente na capacidade de geração e, conseqüentemente na altura das suas torres.

A torre é um elemento muito importante no conjunto de um aerogerador. Além de ter uma influência significativa no custo do equipamento, cerca de 20% a 30% (YOSHIDA, 2006), tem uma grande importância como elemento estrutural. Caso a torre chegue a entrar em colapso, todo o equipamento também colapsa, diferentemente de outras partes como as pás, ou até mesmo o gerador, que podem ser substituídos ou reparados independentemente.

São utilizados diferentes sistemas estruturais nas torres eólicas. Os principais tipos são as torres treliçadas, as torres cilíndricas e as torres cônicas. Há também uma variação no material em que estas torres são fabricadas, os mais utilizados são o aço e o concreto. No Brasil, são mais correntes, principalmente nos grandes parques de geração de energia eólica, as torres tubulares circulares de aço e as torres circulares de concreto.

## 1.2 HISTÓRICO

Após a realização de uma pesquisa bibliográfica, identificaram-se alguns trabalhos relacionados com torres de geradores eólicos, dentre os quais, os mais relevantes são detalhados a seguir. Porém, não foram identificados relatos de trabalhos no Brasil.

NEGM *et al.* (2000), utilizaram uma torre seccionada em segmentos uniformes. Consideraram o material utilizado como linear-elástico, isotrópico e homogêneo, e a torre possuindo seção de parede fina. Para a análise tomou-se a teoria de Euler-Bernoulli e os efeitos secundários como deformações axiais e de cisalhamento não foram consideradas.

O problema de otimização foi formulado como um problema de programação matemática não-linear. As variáveis de projeto utilizadas foram a área, o raio de giração e o comprimento de cada segmento. Eles avaliaram o comportamento de quatro funções objetivo diferentes: minimização do peso da torre; minimização da rigidez; maximização da relação rigidez/peso; maximização das frequências naturais.

Foram utilizadas restrições limitando as tensões; garantindo que uma deflexão máxima não fosse ultrapassada; evitando a ocorrência de ressonâncias; bem como limitando a massa total. Também foram implementadas restrições laterais no diâmetro médio e na espessura da torre para garantir que não ocorresse instabilidade local. Para a espessura máxima, tomou-se àquela que não violasse a configuração da torre como tubular de parede fina (espessura igual a dez por cento do diâmetro). Utilizaram o método da penalidade interior acoplado com técnicas de busca multidimensional e com interpolação quadrática de Powell.

NEGM *et al.* (2000), realizaram a aplicação em dois modelos de otimização para uma torre de 30 m de altura. O primeiro utilizando uma torre cilíndrica engastada constante, como uma viga engastada, de tal forma que possuísse a mesma massa de uma torre treliçada existente. O segundo modelo foi utilizado uma torre tubular, de vários segmentos, onde foi

otimizada através de duas funções objetivos: a primeira maximizando as três primeiras frequências do momento para o conjunto torre-rotor; a segunda maximizando as frequências da torre isoladamente.

BAZEOS *et al.* (2002), realizaram uma análise por elementos finitos de um protótipo de uma torre de aço cônica de 38m de altura, de acordo com as recomendações das normas alemãs. A torre possuía um diâmetro inferior de 2,8 m e superior de 1,82 m. As espessuras das chapas variavam de 16 mm (na base) até 10 mm (no topo). A torre era dividida em três segmentos de forma que facilitasse o transporte e a montagem no local. Internamente existiam enrijecedores circulares para prevenir a ocorrência de flambagem.

BAZEOS *et al.* (2002) consideraram cargas estáticas provenientes das ações aerodinâmicas (ações do vento na torre e ações provenientes do aerogerador), bem como do peso próprio e do peso do aerogerador. Também foram consideradas cargas dinâmicas devido às ações sísmicas de acordo as especificações da norma grega de sismos. A análise do modelo foi realizada utilizando elementos finitos e levaram em conta três considerações: o cisalhamento local; a influência da porta de visita, bem como dos enrijecedores ao redor dela no comportamento geral da estrutura; a determinação das características dinâmicas e o comportamento da torre em possível sismo, considerando a base engastada e interação solo-estrutura.

LAVASSAS, *et al.* (2003) realizaram a análise e o projeto de um protótipo de uma torre de aço em tronco de cone de aproximadamente 45 m de altura para um aerogerador de 1 MW, composta de dois segmentos. O diâmetro inferior da torre era de 3,30 m e o superior é de 2,10 m. A espessura das chapas variavam de 18 mm (base) a 10 mm (topo). Foram utilizados enrijecedores circulares internos espaçados a cada 3.025m. Foram considerados ações da gravidade, sismo e vento segundo os respectivos Eurocodes. Foram realizadas verificações quanto à fadiga de acordo com a metodologia do Eurocode. Dois modelos de análise por elementos finitos foram considerados. No primeiro, realizaram uma análise linear elástica da torre; no segundo, foi modelada a torre e a fundação, sendo utilizada uma análise não-linear. Porém, apenas foi realizado o projeto convencional da torre, não se utilizando ferramentas de otimização.

YOSHIDA (2006), realizou a otimização de uma torre eólica cônica, de 80 m de altura, com os valores dos diâmetros da base e do topo prefixados em 4,2 m e 2,5 m respectivamente. Para realizar a otimização do problema, utilizou algoritmos genéticos (AG's). A função objetivo foi a minimização da função peso, e as variáveis de projeto

utilizadas foram as espessuras das chapas de cada segmento (discretas) e o diâmetro de cada segmento (contínua). As restrições do problema de otimização foram os limites de segurança para compressão e flambagem por cisalhamento; restrições de fadiga; e a frequência natural para o primeiro modo de flexão.

Na análise YOSHIDA (2006) considerou: os carregamentos obtidos através de um programa de simulações aero-elásticas; as cargas provenientes de tempestades e terremotos especificadas na “*Bulding Standard Law of Japan*” (BSL) e pelas recomendações da “*Architectural Instituted of Japan*”; os danos provocados pela fadiga na estrutura; estabilidades; localização dos flanges conforme capacidade de transporte; e a localização das portas de visitas.

YOSHIDA (2006) utilizou vários parâmetros como dados de entrada do problema: para os parâmetros gerais do programa foram utilizados a altura da torre, diâmetros da base e do topo, massa do aerogerador, centro de massa, limites de peso e comprimento para transporte; para o material, utilizou o módulo de elasticidade, densidade, curva SN, limites de escoamento e ruptura do material; para os parâmetros estruturais considerou as espessuras das chapas disponíveis (discretas), o comprimento dos segmentos, fatores de concentrações de tensões nos flanges e portas de acesso, a massa dos flanges e de componentes não estruturais, e a categoria da solda; para as cargas da BSL, levou em conta a velocidade característica do vento, a classe de rugosidade, e a aceleração provocada por terremoto na base.

UYS, *et al.* (2007) utilizaram uma torre de aço levemente cônica de 45 m de altura, com diâmetro inferior de 3,30 m, variando linearmente até o diâmetro superior de 2,10 m. A torre foi dividida em três segmentos de 15 m, e cada segmento era composto de 5 chapas de 3 m de largura. Utilizaram enrijecedores para evitar a ovalização variando a sua quantidade de um mínimo de 5 até um máximo de 15. Eles realizaram uma otimização do projeto, minimizando uma função custo, composta pelos custos do material e de fabricação (conformação da chapa, corte, montagem e soldagem dos enrijecedores). Consideraram os carregamentos de vento que atuam na Grécia, segundo o Eurocode e restrições quanto à flambagem global e local de acordo com as recomendações da Det Norske Veritas (DNV) e do American Petroleum Institute (API). A força do vento e o momento agindo no topo da torre foram retirados do trabalho de LAVASSAS *et.al.* (2003). As variáveis de projeto foram as espessuras médias das chapas de cada segmento da torre, e a dimensão e o número de enrijecedores utilizados. O problema de otimização foi resolvido usando o algoritmo de busca de Rosenbrock. Concluíram que o custo aumenta a medida que se aumenta o número de

enrijecedores, mas que a diferença entre o custo da quantidade mínima de enrijecedores (5) e a máxima (15), variou apenas de 1,5% a 3,6%. Após a otimização da torre, realizaram o cálculo da frequência natural, bem como calcularam a resistência à fadiga das soldas de filetes utilizando o Eurocode.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é formular o problema de projeto estrutural de torres tubulares de aço para geradores eólicos como um problema de otimização.

Os objetivos específicos são:

- Iniciar o estudo sobre o tema, ainda pouco explorado no Brasil;
- Empregar critérios de análise e projeto baseados em normas brasileiras;
- Considerar as características brasileiras, ou mais especificamente regionais, na definição de elementos de projeto da torre;
- Adotar modelos simplificados que sejam atrativos quanto à solução, por exemplo, no que diz respeito à análise estrutural;
- Considerar características discretas para parâmetros de projeto quando a prática assim exigir;
- Desenvolver a formulação inicialmente para uma torre tubular prismática de seção transversal circular;
- Desenvolver a formulação para uma torre tubular composta de segmentos em tronco de cone;
- Resolver o problema usando Algoritmos Genéticos;
- Verificar o comportamento de soluções ótimas por meio de uma análise mais precisa por elementos finitos de casca.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos, onde o capítulo 1 apresentou a justificativa e a importância do tema da energia eólica nos dias atuais, alguns trabalhos desenvolvidos relacionados ao assunto e os objetivos desta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta um histórico da evolução dos aerogeradores e da capacidade instalada mundial, bem como os tipos existentes e as principais partes que os compõem. Também são apresentados os tipos de torres utilizadas, suas principais vantagens e desvantagens.

No capítulo 3 são descritas as análises e as verificações de segurança de dois modelos de torres eólicas. No primeiro, a torre é modelada como uma viga clássica, engastada na base e livre no topo. No segundo modelo, a torre é discretizada como elementos finitos de pórtico plano. Também são apresentadas a formulação para o cálculo das cargas de vento atuantes nas torres e a formulação para a determinação dos esforços atuantes e resistentes conforme as recomendações da norma brasileira.

O capítulo 4, trata da otimização de problemas de engenharia. São definidos os conceitos básicos da formulação matemática e dos Algoritmos Genéticos, bem como suas características, vantagens e desvantagens.

O capítulo 5, descreve-se dois modelos de otimização utilizados no trabalho. O primeiro relativo a uma torre cilíndrica prismática de aço, onde foi analisada conforme o modelo de viga proposto no capítulo 3. O segundo modelo trata de uma torre com segmentos em tronco de cone onde foi analisada utilizando elementos de pórtico plano.

O capítulo 6, apresenta as aplicações realizadas para os dois modelos e os resultados obtidos. O capítulo 7 contém as conclusões e considerações finais do trabalho.

## 2 TORRES PARA GERADORES EÓLICOS

---

### 2.1 GERADORES EÓLICOS

O início do aproveitamento da energia do vento como energia elétrica se dá através da adaptação de um cata-vento por volta do século XIX, em Cleveland, Ohio. Este equipamento fornecia energia contínua para o carregamento de baterias que seriam utilizadas para fornecer energias para algumas lâmpadas incandescentes (SHEPHERD,1994 *apud CRESESB* 2010).

Após este modelo inicial de aproveitamento da energia eólica em energia elétrica, a Rússia foi responsável pelo desenvolvimento das primeiras turbinas eólicas de grande porte, por volta de 1930. Tratava-se de uma aerogerador de 100 kW conectado a uma linha de transmissão de 6,3kV.

Com o advento da 2ª Guerra Mundial, houve um crescimento no desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte, uma vez que a energia proveniente do petróleo tornou-se escassa no período de guerra.

Porém, com o fim da 2ª Guerra Mundial, tanto o petróleo voltou a ser encontrado em abundância, como foram construídas grandes usinas hidrelétricas que fizeram com que a energia eólica não possuísse competição comercial. Assim, a construção de novos aerogeradores foi realizada apenas para o desenvolvimento de pesquisas, utilizando técnicas aerodinâmicas para construção de pás e aperfeiçoamento de mecanismos de geração.

Nas décadas subsequentes, alguns países como a Inglaterra, França, Dinamarca, e Alemanha, desenvolveram novas técnicas e modelos de aerogeradores. Porém a grande evolução tanto na comercialização como na tecnologia, como no tamanho dos aerogeradores, ocorreu nos últimos 15 anos, como pode ser observado na Figura 3.

Assim, durante estas décadas de pesquisas e desenvolvimentos, surgiram vários tipos de aerogeradores. De acordo com a DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION – DWIA (2009), os aerogeradores podem ser classificados quanto à posição do eixo do seu rotor em aerogeradores de eixo vertical (Figura 4) e os aerogeradores de eixo horizontal (Figura 5).

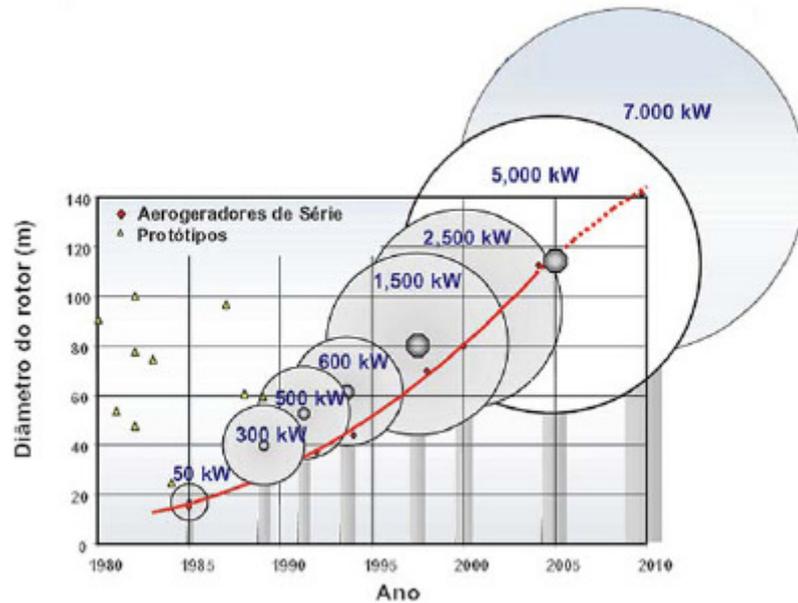


Figura 3 – Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005 (CRESESB, 2010)

Os aerogeradores de eixo vertical são equipamentos mais simples, pois não existe o mecanismo de direcionamento. A ausência desse equipamento impede que o ângulo de ataque do vento nas pás seja mantido constante, tornando-o menos eficiente além de provocar vibrações excessivas.

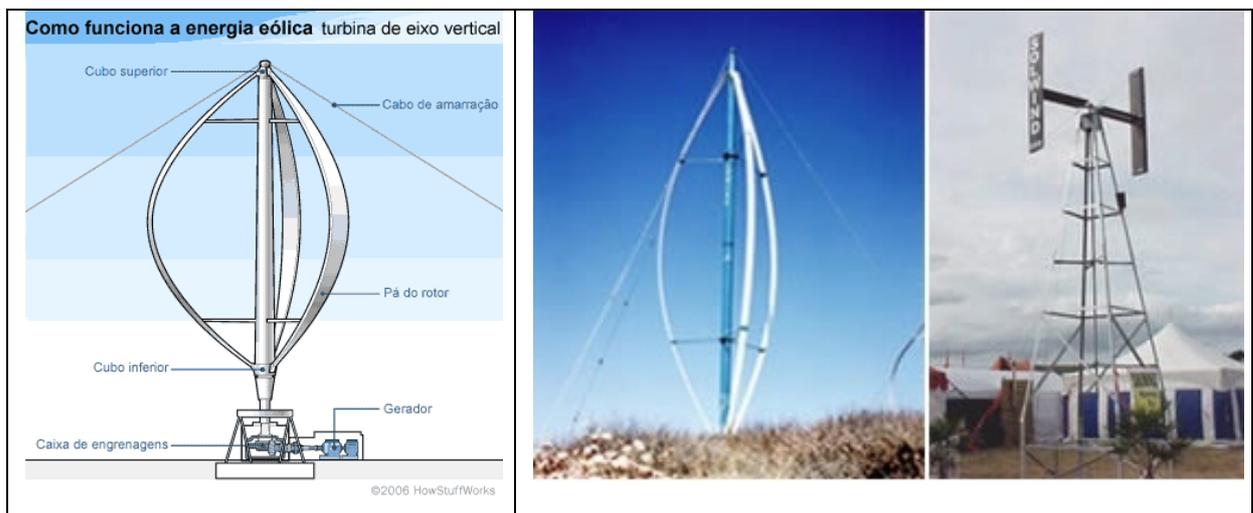


Figura 4 – Aerogeradores de eixo vertical (LAYTON, 2010)

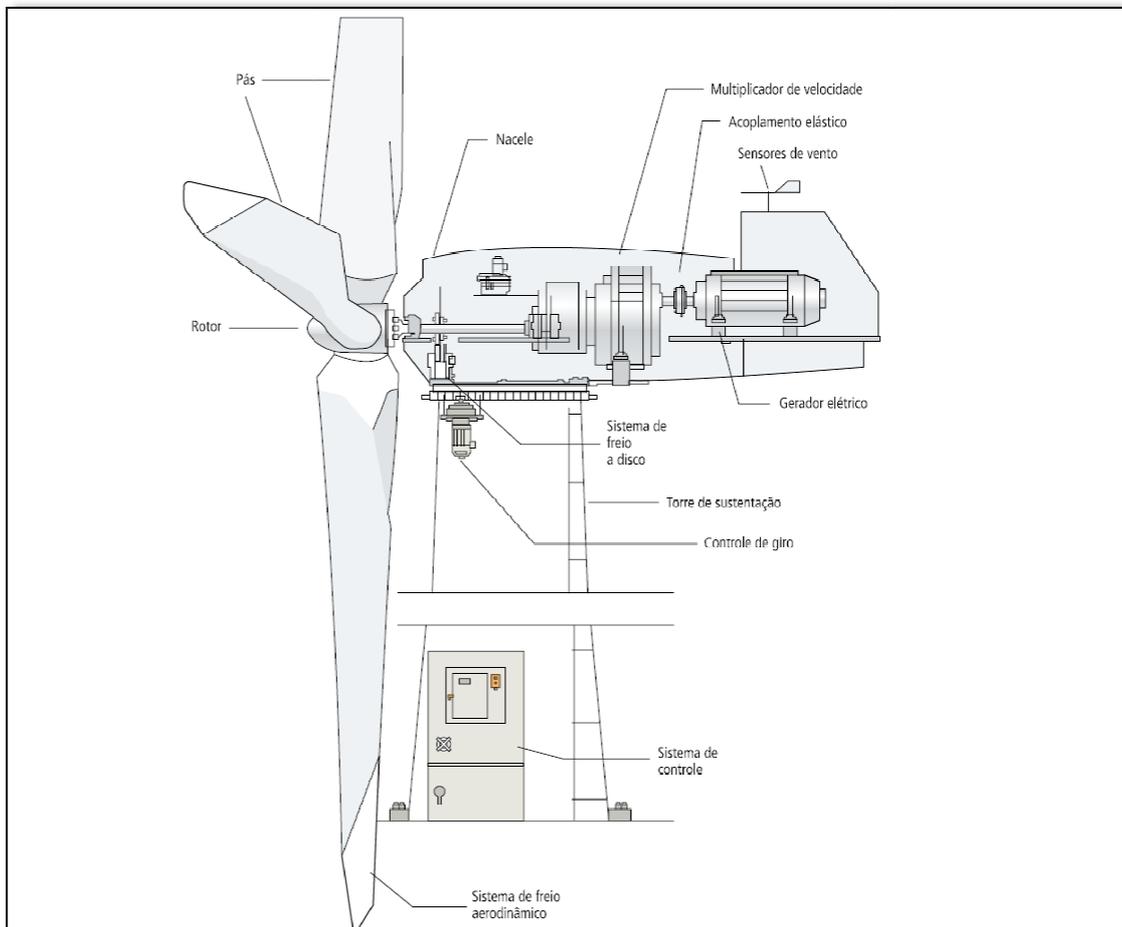
Os aerogeradores de eixo horizontal possuem mecanismos que direcionam a posição do aerogerador conforme a direção do vento, proporcionando um melhor aproveitamento. Por isso, a maioria dos aerogeradores é desse tipo.

Podemos ainda dividir os aerogeradores de eixo horizontal em duas classes, de acordo com o número de pás, os de 2 ou 3 pás e os de múltiplas pás.

Os rotores de múltiplas pás são bastante utilizados, mas são aplicados praticamente para o bombeamento de água. Possuem baixa potência, que é limitada pela área do seu rotor. Assim, não são indicados para a geração de energia elétrica.

Os rotores de duas ou três pás são utilizados em todos os aerogeradores modernos. Proporcionam uma grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor. Contudo, necessitam de ventos com velocidades mais elevadas.

A Figura 5 ilustra um aerogerador horizontal com as principais partes que o compõe, que são:



**Figura 5 – Esquema de um aerogerador de eixo horizontal (ANEEL, 2001)**

- **Pás** – a maioria dos geradores eólicos possui duas ou três pás. Estas pás assemelham-se a asas de aviões. Geralmente são fabricadas com material composto com resinas poliéster ou epóxi reforçado com fibra de vidro (GRP).

Também podem ser reforçadas com fibra de carbono, ou de kevlar, mas essa escolha ainda torna as pás inviáveis economicamente. As ligas de aço não são usadas por tornarem as pás muito pesadas e as de alumínio por apresentar problemas de fadiga.

- Freios – Freio a disco que tem como objetivo parar o funcionamento do equipamento quando necessário. Podem ser acionados mecanicamente, através de sistemas elétricos ou hidráulicos.
- Sistema de controle – Dependendo da dimensão do aerogerador, é necessário que o mesmo trabalhe dentro de uma faixa limite de velocidade dos ventos, para evitar desgastes e até mesmo danos ao sistema. Dessa forma, o controlador é o responsável por iniciar e parar o funcionamento do gerador eólico, além de controlar a velocidade de rotação.
- Transmissão (Multiplicador de velocidade) – A transmissão é a parte do aerogerador que produz a multiplicação da velocidade do eixo de baixa rotação (ligado ao rotor) com o eixo de alta rotação (ligado ao gerador). A transmissão é um dos equipamentos mais pesados do aerogerador e muito caro.
- Gerador – O gerador por indução é a parte realmente responsável por produzir a energia elétrica. Transforma a energia mecânica de rotação em energia elétrica.
- Rotor – É o conjunto das pás e o hub, que é a peça que acopla as pás ao eixo do aerogerador.
- Sensor de vento – é o responsável por medir a direção do vento e comunicar ao controlador.
- Controlador de giro – é o responsável por direcionar o aerogerador conforme a direção do vento muda, garantindo que o rotor esteja sempre voltado para a direção do vento.
- Sistema de freio aerodinâmico - é o responsável por rotacionar as pás sobre seu próprio eixo, ou seja, dar um passo, modificando assim a área de ataque do vento. Dessa forma, conforme a velocidade do vento é possível controlar velocidade de rotação do aerogerador.
- Torre – É o elemento de sustentação do aerogerador na altura desejada, recebendo ações oriundas do próprio gerador e outras ações diretas como vento, peso próprio, sismo, etc.

Além destas partes indicadas na Figura 5, também são partes de um aerogerador o anemômetro, que mede a velocidade do vento e transmite os dados para o sistema de controle; o eixo de alta velocidade, que aciona o gerador; e o de baixa velocidade, que é acionado pelo rotor.

Em termos gerais, o sistema de geração eólico é dividido em rotor, que engloba as pás e o cubo de fixação destas, a nacelle, que acomoda os demais componentes, a torre e a fundação.

## **2.2 TORRES**

Com a grande evolução que vem sofrendo os aerogeradores, cada dia maiores e mais potentes, se fez necessária a busca de ventos de maiores intensidades e com fluxos mais constantes. Para tanto, as dimensões das torres que suportam os aerogeradores estão cada vez maiores.

Esta tendência de geradores mais potentes e torres mais altas pode ser explicada pelo fato de que aumentando as suas capacidades, não acarretam no aumento de outros custos como o da rede de distribuição e os custos referentes a operação das fazenda eólicas (manutenção, licenças, monitoramento, etc.) (BRUGHUIS, 2003).

Existem torres fabricadas de diversos materiais e formas. Dentre as principais estão as de formato tubular, que são fabricadas tanto em aço como em concreto, ou com ambos (híbridas), as treliçadas e as estaiadas, ambas feitas de aço. Estas últimas são utilizadas apenas para pequenos geradores.

A maioria das torres é fabricada em aço, com segmentos tubulares cônicos que variam de 20 a 30 metros de comprimento, com flanges nas extremidades e parafusados internamente (DWIA, 2009). Esta limitação do comprimento se dá devido à dificuldade de transporte do local de fabricação ao local onde serão instaladas, bem como a dificuldade para a montagem como mostrado na Figura 6 e na Figura 7.



Figura 6 – Transporte de um segmento tubular de uma torre eólica (VILARFORMOSO, 2010)



Figura 7 – Montagem de uma torre eólica tubular (VIEIRA, 2010)

As torres treliçadas, por serem fabricadas com peças de perfis soldados de aço, apresentam cerca de metade do peso de uma torre de segmentos cônicos, e são de fácil montagem. Sua principal desvantagem é quanto à aparência, que não é muito agradável e produz uma agressão visual ao meio ambiente (Figura 8), além de apresentar maior dificuldade na manutenção, devido à quantidade de barras existentes (BRUGHUIS, 2003). Dessa forma, as torres treliçadas praticamente não são utilizadas.



**Figura 8 – Torre eólica treliçada (OTDS, 2010)**

As estaiadas (Figura 9) são utilizadas somente em pequenos aerogeradores. Possuem como vantagem o baixo custo de fabricação, mas como desvantagens apresentam

grande dificuldade de acesso ao aerogerador para manutenção e a necessidade de uma área livre ao redor da torre para a fixação dos cabos de estaios.



**Figura 9 – Torre eólica estaiada (GARY, 2010)**

O custo das torres para geradores eólicos, segundo YOSHIDA (2006) e a DWIA (2009), varia em torno de 20% a 30% do valor total do investimento. Assim, a fase de análise e projeto da torre passa a possuir uma grande importância, pois uma redução no seu custo pode ser significativa para o custo final da energia. Do ponto de vista estrutural, a torre é um elemento cuja integridade é de suma importância, pois sua falha compromete todo o sistema.

## 3 ANÁLISE E VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

---

Neste capítulo serão apresentados dois modelos de análise estrutural para torres de aerogeradores. No primeiro, a torre é modelada como uma viga clássica, engastada na base e livre no topo e soluções analíticas da Resistência dos Materiais são usadas. Este modelo foi desenvolvido para representar torres tubulares cilíndricas. No segundo modelo, a torre é discretizada em elementos finitos prismáticos de pórtico plano, desenvolvido para análise de torres com segmentos de tronco de cone.

As verificações de segurança são baseadas em critérios estabelecidos pela NBR 8800 (2008) que leva em consideração o Estado Limite Último (ELU), e o Estado Limite de Serviço (ELS) da estrutura.

Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura durante toda a sua vida útil, relativo às ações mais desfavoráveis a que estão submetidas. Já o estado limite de serviço diz respeito ao desempenho da estrutura nas suas condições normais de utilização.

A análise foi realizada considerando o material possuindo um comportamento linear-elástico, homogêneo e isotrópico, que é típico dos aços.

### 3.1 MODELO DE VIGAS

A consideração da torre como uma viga é atrativa pela simplicidade do modelo e pode ser aplicada com resultados aceitáveis em alguns casos. A aplicação deste modelo a uma torre tubular cilíndrica prismática é descrita a seguir.

#### 3.1.1 Análise

Neste modelo, analisou-se a torre como uma viga engastada na base e livre no topo sujeita a uma carga axial de compressão  $P$  aplicada no topo, e a uma carga trapezoidal  $w$ , aplicada longitudinalmente ao longo do seu comprimento, conforme ilustrado na Figura 10.

A carga axial  $P$  representa o peso do conjunto rotor/nacele, e a carga distribuída  $w$  representa o efeito da ação do vento.

#### 1.1.1.1 Ação do Vento

Para realizar a análise, tomou-se como referência para o carregamento proveniente das ações do vento, as recomendações da norma brasileira NBR 6123 (1988), analisando-as como forças estáticas.

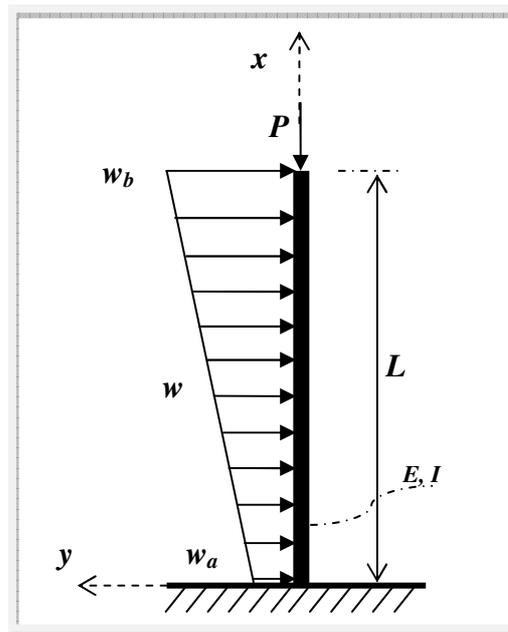


Figura 10 – Modelo de Viga .

Para tanto, identifica-se a velocidade básica do vento ( $V_o$ ), relativa ao local onde a estrutura será instalada. A velocidade básica do vento é definida como a velocidade de uma rajada de três segundos de duração, excedida em média uma vez em 50 anos, a dez metros acima do terreno, em campo aberto e plano (BLESSMANN, 1989). Em seguida multiplica-se a velocidade básica por três coeficientes de ponderação ( $S_1, S_2, S_3$ ), e encontra-se a velocidade característica do vento ( $V_k$ ), conforme Equação (1).

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (1)$$

O fator  $S_1$  é definido como Fator Topográfico, e leva em consideração as variações do relevo do terreno nos arredores de onde a estrutura está localizada. Para terrenos planos ou fracamente acidentados,  $S_1=1,0$ . Quando se tem taludes ou morros, o fator  $S_1$  varia em função da altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado e da inclinação do morro ou talude. Para vales profundos protegidos de ventos de qualquer direção,  $S_1$  assume o valor de 0,9.

O fator  $S_2$  combina os efeitos da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da estrutura. Quanto à rugosidade do terreno, esta é dividida em cinco categorias, que são:

- a) Categoria I: Utilizada para superfícies lisas, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- b) Categoria II: Corresponde a terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados. A cota média considerada no topo dos obstáculos é inferior ou igual a 1,0 m;
- c) Categoria III: Para terrenos planos ou ondulados com obstáculos como poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média no topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.
- d) Categoria IV: Utilizada para locais cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados. A cota média considerada no topo dos obstáculos é considerada igual a 10,0 m.
- e) Categoria V: Para locais com muitos obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25,0 m.

No que diz respeito às dimensões da edificação, a NBR 6123 (1988) apresenta três classes. A primeira, Classe A, se aplica para toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20,0 m. Na segunda, Classe B, é utilizada quando toda ou parte da edificação possui a maior dimensão horizontal ou vertical esteja entre 20,0 m e 50,0 m. A terceira e última, Classe C, é utilizada quando a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50,0 m.

O fator  $S_2$  é definido de acordo com a expressão:

$$S_2 = b F_r \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (2)$$

onde,  $F_r$  é o fator de rajada e sempre correspondente à categoria II;  $z$  é a altura do nível geral do terreno;  $b$  e  $p$  são parâmetro meteorológicos, de acordo com a categoria de rugosidade e a classe de dimensão, conforme Tabela 1.

**Tabela 1 – Parâmetros Meteorológicos (NBR 6123, 1988)**

Categoria	$Z_g$ (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	0,105	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

Valores de  $S_2$  para algumas alturas do terreno, conforme suas categorias e classes estão listadas na Tabela 2.

O terceiro e último fator para se determinar a velocidade característica do vento, é o fator  $S_3$ , denominado de Fator Estatístico. Como o próprio nome diz, este fator é baseado em conceitos estatísticos, considerando o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. A norma NBR 6123 (1988) divide o fator  $S_3$  em cinco grupos.

O Grupo 1 é utilizado para edificações consideradas imprescindíveis em situações de emergência, ou seja, cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro à população. São elas: hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc. O fator estatístico utilizado neste grupo é  $S_3 = 1,10$ .

Tabela 2 – Fator  $S_2$ 

z	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,18	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

No Grupo 2 estão enquadrados os hotéis, residências, comércio e indústria com alto fator de ocupação. Neles é utilizado um fator  $S_3=1,00$ . Já no Grupo 3, estão enquadradas as edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação, sendo utilizado um fator  $S_3=0,95$ .

O Grupo 4 é relativo aos elementos de vedação como telhas, vidros, etc. ( $S_3=0,88$ ) e para o Grupo 5 estão contemplados as edificações temporárias, ou seja, todas as edificações pertencentes aos grupos 1, 2 e 3 durante suas construções ( $S_3=0,83$ ).

Após definidos todos os coeficientes, calcula-se a velocidade característica do vento ( $V_k$ ) ao longo da altura da estrutura, conforme a Equação (1). Em seguida encontra-se a pressão característica do vento ( $q$ ), conforme a Equação (3).

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (3)$$

Para se determinar a força de arrasto resultante da ação do vento ( $f_a$ ), utiliza-se a equação abaixo:

$$f_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (4)$$

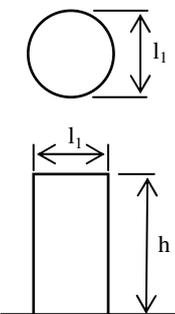
sendo:  $f_a$  a força de arrasto resultante da ação do vento;  $C_a$  o coeficiente de arrasto;  $A_e$  a área frontal efetiva correspondendo a projeção ortogonal de sobre um plano perpendicular à direção do vento.

Para as barras prismáticas de seção circular, lisas (metal, concreto, alvenaria rebocada), o coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) é tabelado (NBR 6123, 1988, p. 22) conforme a relação da altura com o diâmetro e dependem do número de Reynolds (Tabela 3). O número de Reynolds é definido como:

$$Re = 70000 \cdot V_k \cdot d \quad (5)$$

onde,  $d$  é o diâmetro das barras em metros, e  $V_k$  é a velocidade dada em metros por segundo.

**Tabela 3 – Coeficiente de Arrasto  $C_a$  (NBR 6123, 1988)**

	$Re \times 10^{-5}$	$h / l_1$						
		1/2	1	2	5	10	20	$\infty$
$\leq 3,5$	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

Para a determinação da carga por unidade de comprimento ( $w$ ), utiliza-se a força de arrasto resultante ( $f_a$ ), considerando uma área com comprimento unitário ao longo da torre. Nesta análise, determinaram-se as velocidades características do vento para cada faixa de altura da torre, conforme as faixas utilizadas na Tabela 2, obtendo-se um carregamento distribuído de forma escalonada. Efetuou-se então, uma simplificação no modelo, variando-se a velocidade linearmente a partir do valor correspondente à carga por unidade de comprimento na extremidade inferior ( $w_a$ ), até o valor correspondente à carga por unidade de

comprimento no topo ( $w_b$ ), obtendo-se um carregamento de forma trapezoidal (Figura 10). Esta mesma modelagem foi utilizada em DICLELI (1997).

Assim, a ação do vento na viga é representada pela carga linear:

$$w = w_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{w_b x}{L} \quad (6)$$

### 3.1.2 Esforços Internos

Na análise deste modelo, temos um esforço axial de compressão provocado pela massa do aerogerador, e esforços de momento fletor e cortante, provenientes da ação do vento.

Integrando-se as equações diferenciais de equilíbrio da teoria de vigas,  $dV/dx = -w$ , usando a Equação (6) e utilizando a condição de contorno  $V=0$  em  $x=L$ , obtém-se o esforço cortante:

$$V = -w_a x + \frac{w_a x^2}{2L} - \frac{w_b x^2}{2L} + \frac{L}{2}(w_a + w_b) \quad (7)$$

De forma semelhante, usando  $dM/dx = V$  e utilizando a condição de contorno  $M=0$  em  $x=L$ , encontra-se o momento fletor:

$$M = \frac{(w_a - w_b)}{6L} x^3 - \frac{w_a x^2}{2} + \frac{L}{2}(w_a + w_b)x - \frac{L^2}{3} \left(\frac{w_a}{2} + w_b\right) \quad (8)$$

### 3.1.3 Verificações de Segurança

Para as verificações de segurança utilizaram-se critérios relativos ao Estado Limite Último da estrutura (ELU), e ao Estado Limite de Serviço (ELS), recomendados pela NBR 8800 (2008), bem como as indicações da NBR 8681 (2003).

No modelo proposto, o carregamento considerado gera na viga esforço normal ( $N$ ), força cortante ( $V$ ) e momento fletor ( $M$ ), não apresentando torção. Assim, realizou-se a verificação conforme os critérios de resistência de barras submetidas a essa combinação de esforços solicitantes (NBR 8800, 2008, p. 53).

Dessa forma, para que o projeto satisfaça as exigências da NBR 8800 (2008), é necessário que as seguintes condições sejam atendidas:

$$\text{Para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2, \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (9)$$

$$\text{Para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2, \quad \frac{N_{Sd}}{2 \times N_{Rd}} + \left( \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (10)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (11)$$

onde:  $N_{Sd}$  é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;  $N_{Rd}$  é a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão, a que for aplicável;  $M_{Sd,z}$  e  $M_{Sd,y}$  são momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos  $x$  e  $y$  da seção transversal e  $M_{Rd,z}$  e  $M_{Rd,y}$  são os momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos  $x$  e  $y$  da seção transversal;  $V_{Sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo;  $V_{Rd}$  é a força cortante resistente de cálculo.

### 3.1.3.1 Coeficientes de Ponderação

Os coeficientes de ponderação dos esforços solicitantes são tratados segundo as considerações da (NBR 8681, 2003). Quando o cálculo dos esforços atuantes é realizado em regime elástico linear, os coeficientes de ponderação podem ser aplicados tanto à ação característica quanto diretamente ao esforço característico.

Para as combinações normais, que são aquelas cujos carregamentos decorrem do uso previsto da estrutura, levando-se em consideração o estado limite último, tem-se:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (12)$$

onde:  $\gamma_{gi}$  é o coeficiente de ponderação para os estados limites últimos das cargas permanentes;  $F_{Gi,k}$  é o valor característico das ações permanentes;  $\gamma_q$  é o coeficiente de ponderação para os estados limites últimos das ações diretas variáveis;  $F_{Q1,k}$  é o valor característico da ação variável considerada como ação principal para a combinação;  $\psi_{0j} F_{Qj,k}$  é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis.

Os valores dos coeficientes de ponderação para as ações permanentes, considerado para combinações últimas, majoram os valores representativos das ações permanentes que provocam efeitos desfavoráveis e minoram os valores representativos daquelas que provocam efeitos favoráveis para a segurança da estrutura. A Tabela 4 apresenta valores destes coeficientes de ponderação quando as ações permanentes diretas são consideradas separadamente. A Tabela 5 apresenta os valores quando as ações permanentes diretas são consideradas agrupadas. As edificações do tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam  $5 \text{ kN/m}^2$ , e as edificações do tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam  $5 \text{ kN/m}^2$ .

**Tabela 4 – Ações permanentes diretas consideradas separadamente (NBR 8681, 2003)**

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio de estruturas metálicas	1,25	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,30	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,40	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos	1,50	1,0
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas metálicas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,20	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,30	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos	1,40	1,0
Excepcional	Peso próprio de estruturas metálicas	1,10	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,20	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos	1,30	1,0

**Tabela 5 – Ações permanentes diretas agrupadas (NBR 8681, 2003)**

Combinação	Tipo de estrutura	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Grandes pontes	1,30	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral	1,35	1,0
	Edificação tipo 2	1,40	1,0
Especial ou de construção	Grandes pontes	1,20	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral	1,25	1,0
	Edificação tipo 2	1,30	1,0
Excepcional	Grandes pontes	1,10	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral	1,15	1,0
	Edificação tipo 2	1,20	1,0

Os coeficientes de ponderação das ações variáveis ( $\gamma_q$ ) majoram os valores representativos das ações variáveis que provocam efeitos desfavoráveis para a segurança da estrutura. As ações favoráveis que provocam efeitos favoráveis não são consideradas nas combinações das ações. A Tabela 6 lista os valores de  $\gamma_q$  para serem utilizados quando as ações variáveis são consideradas separadamente. A Tabela 7 lista os valores  $\gamma_q$  para quando as ações variáveis são consideradas conjuntamente.

**Tabela 6 – Ações variáveis consideradas separadamente**

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	Ações truncadas	1,2
	Efeito de temperatura	1,2
	Ação do vento	1,4
	Ações variáveis em geral	1,5
Especial ou de construção	Ações truncadas	1,1
	Efeito de temperatura	1,0
	Ação do vento	1,2
	Ações variáveis em geral	1,3
Excepcional	Ações variáveis em geral	1,0

Tabela 7 – Ações variáveis consideradas conjuntamente

Combinação	Tipo de estrutura	Coefficiente de ponderação
Normal	Pontes e edificações tipo 1	1,5
	Edificações tipo 2	1,4
Especial ou de construção	Pontes e edificações tipo 1	1,3
	Edificações tipo 2	1,2
Excepcional	Estruturas em geral	1,0

Os coeficientes de ponderação das resistências no Estado Limite Último do aço ( $\gamma_s$ ) é dada na Tabela 8 em função da classificação da combinação última de ações. Para o aço estrutural, são definidos dois coeficientes,  $\gamma_{a1}$ ,  $\gamma_{a2}$ . O primeiro relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade e o segundo relacionado à ruptura.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes das ponderações (NBR 8800, 2008)

Combinações	Aço Estrutural	
	Escoamento, flambagem e instabilidade	Ruptura
	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

### 3.1.3.2 Força axial resistente de cálculo

Para o cálculo da força axial resistente de cálculo ( $N_{Rd}$ ), tem-se que:

$$N_{Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (13)$$

onde:

$\chi$  - é o fator de redução associado à resistência à compressão;

$Q$  - é o fator de redução total associado à flambagem local

$A_g$  - é a área bruta da seção transversal.

$f_y$  – tensão de escoamento

$\gamma_{al}$  – coeficiente de ponderação

O fator de redução  $\chi$  é definido em função do índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ ), definido como:

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5, \quad \chi = 0,658\lambda_0^2 \quad (14)$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5, \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (15)$$

onde

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (16)$$

$N_e$  é a força axial de flambagem elástica (NBR 8800, 2008, p. 121), dada por

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (17)$$

onde:

$E$  – módulo de elasticidade;

$I$  – Momento de inércia da seção transversal;

$KL$  – Comprimento de flambagem, sendo  $K = 2$  para o modelo de viga engastada na base e livre no topo.

### 3.1.3.3 Fator de redução total associado à flambagem local

Para prevenir a flambagem local de barras axialmente comprimidas, utilizando paredes de seções circulares (NBR 8800, 2008, p. 129), a norma aplica no cálculo de  $N_{Rd}$  o fator  $Q$  dado por:

$$\text{Para } \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y}, \quad Q = 1,00 \quad (18)$$

$$\text{Para } 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y}, \quad Q = \frac{0,038 E}{\frac{D}{t} f_y} + \frac{2}{3} \quad (19)$$

Além disso, não é prevista a utilização de seções tubulares circulares com  $D/t$  maior que  $0,45E/f_y$ , isto é, deve-se ter:

$$\frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (20)$$

### 3.1.3.4 Momento fletor resistente de cálculo

Para determinar-se o momento fletor resistente de cálculo, utilizando seções tubulares circulares, considerando o estado limite de flambagem local de uma parede de tubo (NBR 8800, 2008, p. 133), tem-se:

$$\text{Para } \lambda \leq \lambda_p, \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (21)$$

$$\text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( \frac{0,021E}{\lambda} + f_y \right) W \quad (22)$$

$$\text{Para } \lambda > \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( \frac{0,33E}{\lambda} \right) W \quad (23)$$

sendo:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (24)$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y} \quad (25)$$

$$\lambda_r = \frac{0,31E}{f_y} \quad (26)$$

onde:

$M_{pl}$  - é o momento de plastificação, que é definido como o produto do módulo de resistência plástico ( $Z$ ) pela resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ):  $M_{pl} = Z \cdot f_y$ . Para seções tubulares de paredes finas,  $Z = t \cdot D^2$ .

$\lambda_p$  - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

$\lambda_r$  - parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$W$  - é o módulo de resistência elástico, sendo para uma seção tubular circular de parede fina definida por:

$$W = \pi t \frac{D^2}{4} \quad (27)$$

Para assegurar a validade de uma análise elástica, não se considera para o momento resistente valores maiores que o dado por:

$$M_{Rd} \leq \frac{1,50 W f_y}{\gamma_o} \quad (28)$$

onde  $\gamma_o$  é o coeficiente de ponderação da resistência.

### 3.1.3.5 Força Cortante Resistente de Cálculo

Para efetuar-se a verificação do esforço cortante, deve-se determinar a força cortante atuante em um dos eixos centrais de inércia, estando os elementos sujeitos a combinações de esforços (NBR 8800, 2008, p. 55).

Assim, para elementos de seções tubulares circulares (NBR 8800, 2008, p. 52), tem-se:

$$V_{Rd} = \frac{0,5 \tau_{cr} A_g}{\gamma_{a1}} \quad (29)$$

sendo,  $\tau_{cr}$  igual ao maior dos seguintes valores:

$$\tau_{cr} = \frac{1,6 E}{\sqrt{\frac{L_v}{D}} \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{5}{4}}} \leq 0,60 f_y \quad (30)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78 E}{\left(\frac{D}{t_d}\right)^{\frac{3}{2}}} \leq 0,60 f_y \quad (31)$$

onde:

$D$  é o diâmetro externo da seção transversal;

$t_d$  é a espessura de cálculo da parede da seção transversal, tomada igual a 0,93 vezes a espessura nominal para tubos com costura e igual à espessura nominal para tubos sem costura;

$L_v$  é a distância entre as seções de forças cortantes máximas e nulas.

A Equação (30) representa uma verificação relativa ao estado limite último de flambagem por cisalhamento. Já a Equação (31) representa a verificação em relação ao estado limite último de escoamento. Assim, a mais crítica das duas situações é tomada na determinação da força cortante resistente de cálculo.

### 3.1.3.6 Deslocamento no Topo

Para determinar o deslocamento horizontal no topo do modelo, utiliza-se o Método da Carga Unitária, conforme Figura 11, sendo o momento para uma carga unitária horizontal em  $x=L$  dado por:

$$m = -L + x \quad (32)$$

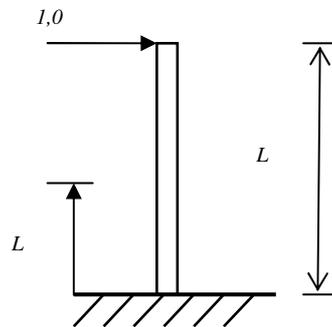


Figura 11 – Modelo de carga unitária

Assim, o deslocamento no topo é obtido pela soma das integrais dos segmentos dado por:

$$v = \int_0^L \frac{m M}{EI} dx = \frac{1}{E} \sum_{k=1}^s \frac{1}{I_k} \int_{x_k}^{x_{k+1}} m M dx \quad (33)$$

onde,  $s$  é o número de segmentos da torre e  $M$  é o momento fletor da torre dado pela Equação (8).

### 3.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A aplicação do modelo de viga em uma torre composta por segmento de tronco de cone com a obtenção de expressões analíticas para os deslocamentos e esforços solicitantes, considerando a variação da geometria e a ação do vento, não é tão simples. Neste caso, é mais adequado realizar a análise por elementos finitos para determinação dos deslocamentos e esforços solicitantes. Considerando o comportamento da torre restrito ao plano formado pela direção do vento e o seu eixo, a análise pode ser realizada usando-se elementos de pórtico plano (Figura 12) (COOK, MALKUS, *et al.*, 2002).

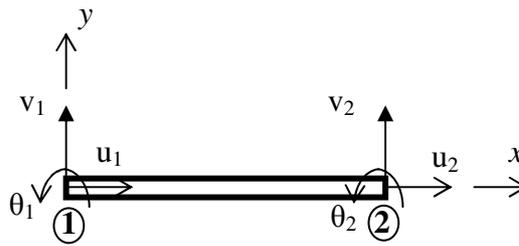


Figura 12 – Elemento pórtico plano (sistema local)

### 3.2.1 Análise e dimensionamento

Neste modelo, a torre suposta engastada na base e livre na outra extremidade, é discretizada em  $n$  elementos finitos. Cada elemento, sendo prismático, possui as propriedades equivalentes à seção média do trecho tronco de cone que ele representa na torre.

A torre está sujeita às ações de uma carga axial de compressão ( $P$ ) aplicada no topo, devido ao peso do aerogerador, à carga axial de compressão distribuída ( $PP$ ) relativa ao peso próprio da estrutura, e a uma carga trapezoidal ( $w$ ) aplicada transversalmente ao longo de seu comprimento devido às ações do vento (NBR 6123, 1988).

Por se tratar de um modelo de uma torre composta de segmentos de tronco de cone, não seria possível realizar a simplificação de se determinar a carga do vento na parte inferior e variá-la linearmente ao longo do seu comprimento, até o valor relativo da carga superior, uma vez que o diâmetro não é constante.

Por isso, optou-se por efetuar uma simplificação semelhante, utilizando a variação da pressão característica do vento (Figura 13), e não a força característica. Assim para a determinação da carga do vento, multiplicou-se a pressão atuante no nível da seção média do elemento, pelo coeficiente de arrasto e pelo diâmetro, obtendo-se uma carga distribuída (Figura 14).

$$w_{elem} = C_a \cdot q_{elem} \cdot D_{elem} \quad (34)$$

onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto (NBR 6123, 1988, p. 21);  $q_{elem}$  é a pressão do vento atuante no elemento finito conforme já descrito;  $D_{elem}$  é o diâmetro representativo do elemento finito.

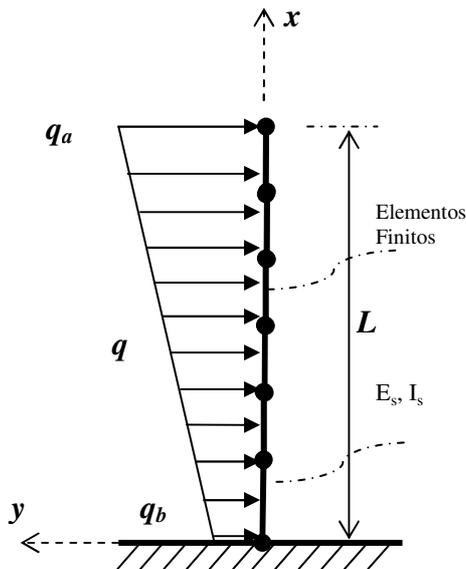


Figura 13 – Pressão característica do vento no modelo de elementos finitos

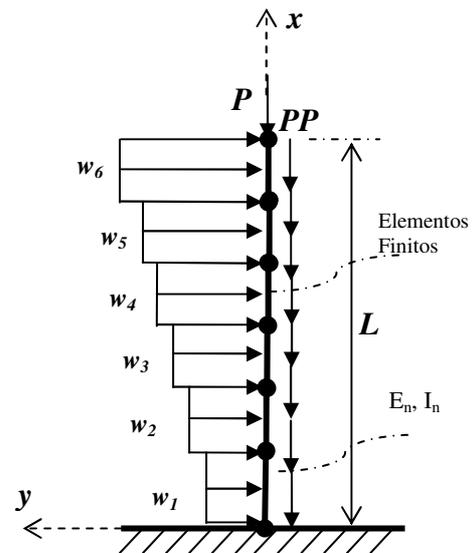


Figura 14 – Cargas atuantes no modelo de elementos finitos

### 3.2.2 Verificações de Segurança

Para as verificações de segurança do modelo em questão, utilizaram-se os mesmos critérios determinados na NBR 8800 (2008), conforme descritos no item 3.2 deste trabalho.

Porém, diferentemente do que foi realizado no modelo de viga, as verificações da norma neste modelo são feitas em cada elemento finito, considerando fatores de redução associados à resistência a compressão e à flambagem local. Assim, é necessário utilizar um artifício que considere a flambagem global do modelo como um todo, e não apenas a flambagem global de cada elemento finito.

Dessa feita, foi realizado um artifício na verificação da força axial resistente de cálculo ( $N_{rd}$ ). Utilizou-se na determinação da força axial de flambagem elástica ( $N_e$ ), o comprimento do modelo ( $L$ ) como o comprimento de flambagem, e não o do elemento ( $L_n$ ), além de considerar o momento de inércia médio de todos os elementos finitos ( $I_{med}$ ):

$$N_e = \frac{\pi^2 E I_{med}}{(KL)^2} \quad (35)$$

## 4 OTIMIZAÇÃO

---

### 4.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Segundo VANDERPLAATS (1984), se referindo à engenharia, o projeto é considerado um processo macroscópico, onde são definidos os sistemas que serão adotados, os tipos, geometria e localização dos elementos, os materiais utilizados, etc. A análise é o processo onde são obtidas as respostas do comportamento mecânico de um determinado sistema em termos de tensões, deformações, frequências, dentre outros. O processo de projeto completo envolve análises e verificações do projeto a partir do qual decisões são tomadas visando a sua melhoria ou otimização (GHABOUSSI, 2001).

No processo de projeto tradicional, restrições críticas, definidas em geral pela experiência do projetista, são usadas para se obter uma solução inicial. As demais restrições são verificadas e se necessárias, mudanças são realizadas. O resultado é um projeto dito satisfatório. (ARORA, 1997).

Devido a esse processo de iteração “intuitivo” do projeto tradicional, a experiência do projetista é um fator muito importante para a obtenção de projeto considerado “bom”. Também é característica desse tipo de projeto, o fato dele ser conservador, pois na medida em que todos os parâmetros estiverem satisfeitos, o projeto também estará. Dessa forma, o projeto tradicional pode se tornar oneroso tanto em tempo como em recursos financeiros, caso o redimensionamento seja realizado de uma forma que não caminhe rapidamente para o desejável.

Na otimização, o processo de projeto consiste em buscar valores para um conjunto de parâmetros que definem o sistema, denominados de variáveis de projeto, que minimizam ou maximizam uma função. Contudo, para que o projeto seja viável é necessário, em geral, que seja satisfeita uma série de exigências que são denominadas de restrições. No projeto definido como ótimo, as restrições são verificadas simultaneamente.

Outra característica importante é que o algoritmo não encerra o projeto quando os critérios (restrições) de projeto estão satisfeitos, mas quando o mínimo da função objetivo ou função custo, geralmente o peso, ou custo monetário, é alcançado segundo um dado critério

de convergência. A Figura 15 ilustra as diferentes etapas de um projeto convencional e de um projeto ótimo.

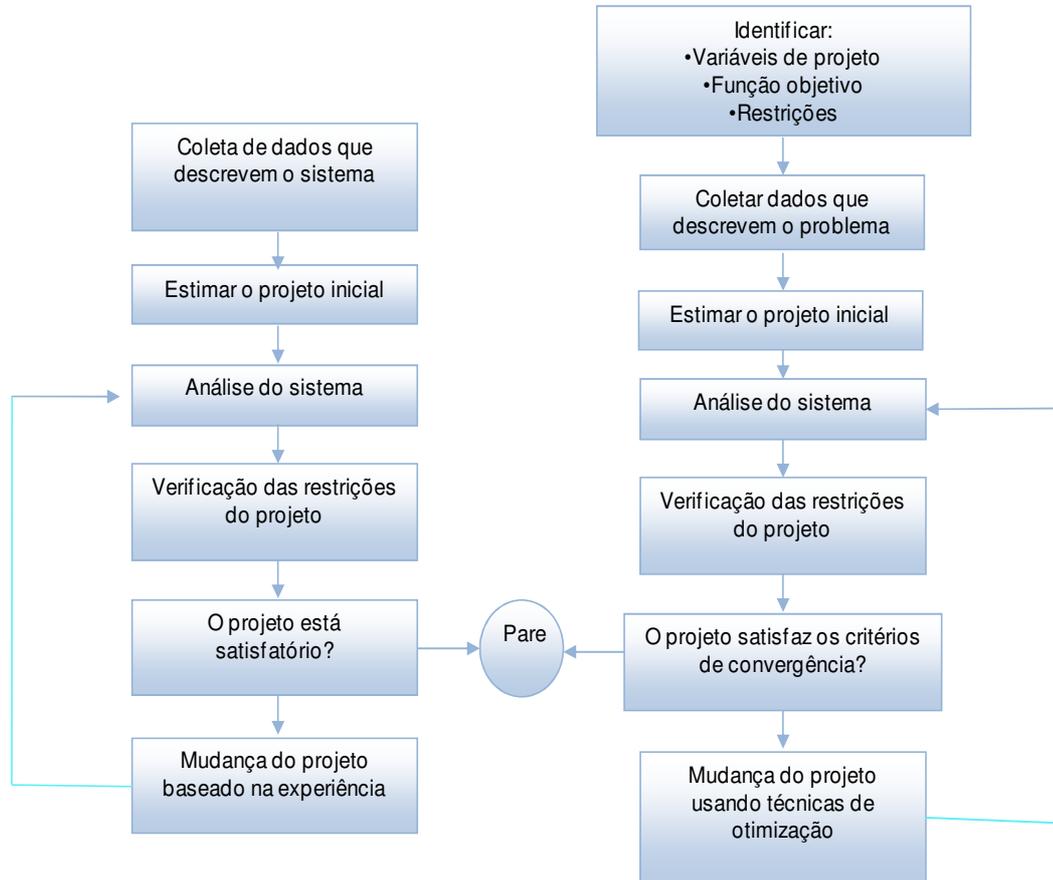


Figura 15 - Projeto convencional versus projeto ótimo (ARORA, 1997).

Segundo VANDERPLAATS (1984), podemos escrever a formulação geral do problema de otimização da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimizar } \mathbf{X} & f(\mathbf{X}) \quad \text{função objetivo} \\
 \text{Sujeito a:} & g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{restrições de desigualdade} \\
 & h_k(\mathbf{X}) = 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{restrições de igualdade} \\
 & X_i^l \leq X_i \leq X_i^u \quad i = 1, \dots, n \quad \text{restrições laterais}
 \end{array} \quad (36)$$

onde  $\mathbf{X}$  é o vetor de variáveis de projeto e  $X_i^l$  e  $X_i^u$  são limites inferiores e superiores das variáveis de projeto.

Existem problemas de otimização com restrições e problemas sem restrições. Também pode ser feita uma divisão com relação à natureza da função objetiva e das restrições do problema. Quando todas as funções são lineares, trata-se de um problema de otimização linear, mas quando pelo menos uma é não-linear, tem-se um problema de otimização não-linear. Quando as variáveis só podem assumir valores de um dado conjunto discreto, temos um problema de otimização discreta.

Para utilizar variáveis discretas nos problemas de otimização, são realizadas modificações na formulação do problema. Sendo  $\{D\}_i$  o conjunto que contém os valores discretos possíveis para a variável  $X_i$ , então, as restrições laterais são substituídas (para as variáveis discretas) por:

$$X_i \in \{D\}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (37)$$

onde  $n$  é o número de variáveis.

O problema também pode ser misto, apresentando tanto variáveis discretas como contínuas. Neste caso, a formulação combina as restrições laterais das Equações (36) com a forma da Equação (37).

Na prática, os problemas de engenharia apresentam muitas variáveis de projeto discretas, que geralmente são determinadas pela disponibilidade comercial como, por exemplo, espessuras de chapas de aço, bitolas de perfis, dimensões de parafusos, dentre outros. Havendo variáveis de natureza discreta, os AG's se apresentam como uma boa alternativa para solução do problema de otimização, pois os métodos clássicos de programação matemática não são muito eficientes para esse tipo de problema.

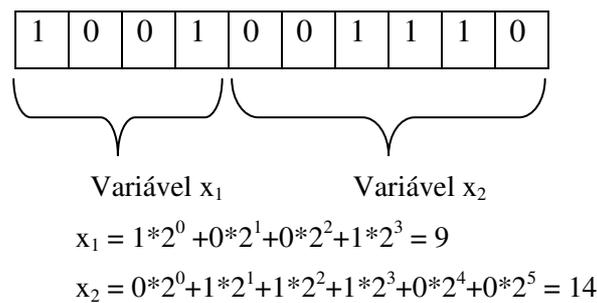
## 4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos baseiam-se na simulação do processo de evolução natural de Darwin e em princípios da genética, por isso são classificados como algoritmos evolutivos. Foram desenvolvidos por John Holland em meados dos anos 70 (GOLDBERG, 1989).

Os AG's são um método robusto, computacionalmente simples e ainda uma poderosa ferramenta para resolver problemas difíceis de otimização. As principais

características dos AG's que fazem com que eles se diferenciam dos demais métodos de busca são (SAIT e YOUSSEF, 1999):

- a) Trabalha com parâmetros codificados – Os AG's básicos (canônicos) trabalham com uma codificação dos parâmetros, e não com os próprios parâmetros. Por esta razão, uma das exigências quando se emprega AG's para resolução de um problema é encontrar uma boa representação da solução na forma de um cromossomo. Neste caso, os AG's trabalham em um espaço codificado (genótipo) enquanto outros métodos buscam a solução no espaço original (fenótipo). A representação binária é o padrão normalmente adotado. Os valores das variáveis são convertidos para a base binária (0/1) e são ordenados em um *string* ou vetor. A Figura 16 mostra um cromossomo representando uma solução de um problema com duas variáveis do tipo inteira.



**Figura 16 – Representação binária de uma solução**

Uma representação alternativa é a de valor real. É uma representação fenótipa (espaço original) e não há necessidade do mapeamento entre este espaço e o espaço genótipo. Para o exemplo da Figura 16, o cromossomo seria

9	14
---	----

- b) Trabalha com um conjunto de pontos – Diferente de outros métodos de otimização, onde as movimentações no espaço de projeto são realizadas de um ponto para outro através de alguma regra de transição, o que pode convergir para ótimos locais, os AG's trabalham simultaneamente com vários pontos (uma população de soluções), reduzindo a probabilidade de ser encontrado um ótimo local. Dessa forma, ao invés de uma solução, fornecem um conjunto de soluções;

- c) É um método de ordem zero - Necessitam apenas dos valores da função objetivo e dos valores das restrições. Os AG's não são limitados por hipóteses sobre o espaço de busca tais como continuidade e existência de derivadas.
- d) São não-determinísticos – Os AG's usam regras probabilísticas para suas transições (não-determinísticas). Os mecanismos para a escolha dos pais e para a combinação dos genes nos cromossomos são probabilísticos.
- e) São cegos – São cegos no sentido de que eles não sabem quando eles encontram o ótimo. Dessa forma, é necessário que um critério de parada seja estabelecido. Esta é uma característica comum aos algoritmos de ordem zero.
- f) São de fácil implementação e adequados para processamento paralelo.

#### 4.2.1 - Conceitos básicos de Algoritmos Genéticos

Sendo baseados no processo de evolução natural, não é de se estranhar que a maioria dos termos utilizados nos AG's, também são advindos da evolução natural e da genética. A seguir serão descritos os seus principais conceitos:

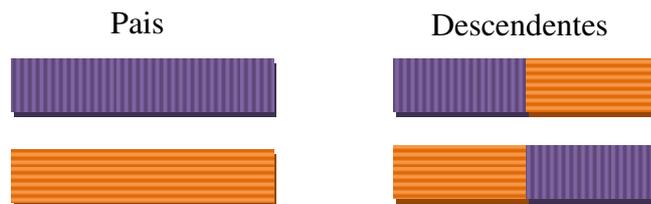
- Cromossomos, Genes e Alelos – A estrutura que especifica como um indivíduo ou solução do problema é constituído é denominado de cromossomo. Genes são os elementos básicos que constituem um cromossomo. Os Alelos são diferentes formas que um gene pode assumir. No exemplo da Figura 16, o cromossomo após a decodificação representa a solução  $X_1=9$ ,  $X_2=14$ . Cada bit é um gene e os alelos são 0 e 1. O tamanho do cromossomo depende da quantidade de variáveis de projeto e do conjunto de valores ou precisão que se quer trabalhar. Na verdade, os AG's só resolvem problemas sem restrições. Então, um problema com restrição deve ser convertido para um problema sem restrição. A estratégia mais usada é a da penalidade exterior. Assim, a função penalizada ou aptidão  $f_a$  torna-se:

$$f_a(\vec{x}, \vec{r}) = f(\vec{x}) + p(\vec{x}, \vec{r}) \quad (38)$$

- Aptidão – A aptidão é um parâmetro que é avaliado para um indivíduo e mede o quanto ele é bom para uma determinada função. Em problemas com restrições, a função aptidão é diferente da função objetivo, tornando-se igual a esta nas soluções viáveis.
- População Inicial – Como os AG's trabalham com uma população de soluções ou indivíduos, se faz necessária uma população inicial para começar o processo iterativo. Quanto ao tamanho dessa população inicial, e a forma como ela é criada, vai afetar a qualidade do resultado obtido. Geralmente essa população é formada de uma maneira aleatória.
- Descendência – Os AG's possuem estratégia de seleção e operadores genéticos que agem nos cromossomos ou em pares de cromossomos produzindo novas soluções, chamadas de descendência.
- Seleção – A seleção é utilizada para selecionar os pais para o cruzamento. Esta seleção é realizada de uma forma probabilística de tal forma que indivíduos mais aptos tenham maior probabilidade de serem escolhidos. Existem diferentes tipos de seleção dentre eles tem-se: ranking, roleta, torneio.
- Elitismo – É a transferência dos melhores indivíduos da população para a futura geração, podendo ou não participar do cruzamento.
- Cruzamento – O cruzamento é um tipo de operador genético que opera em dois pais para poder gerar um ou dois descendentes. Existem diferentes tipos de operadores de cruzamento, e dependendo do tipo de problema, uns são mais eficientes que outros. Um dos tipos é o cruzamento de um ponto (simples), que opera realizando um “corte” e uma “troca” em cada cromossomo. O descendente fica com a parte esquerda de um dos pais e a parte direita do outro pai. Geralmente o ponto de corte é feito de maneira aleatória. Outro tipo de cruzamento é de dois pontos (duplo), que se assemelha ao de um ponto diferenciando-se apenas na quantidade de divisão do cromossomo que passam a ser duas ao invés de uma. A Figura 17 ilustra estes dois tipos de cruzamento.
- Mutação – Como o cruzamento, a mutação também é um operador genético, mas é aplicado em apenas um indivíduo. A mutação aplica a troca de valores dos alelos de alguns genes randomicamente. Não é aplicada em toda a população, mas apenas em uma parcela. Dessa forma, a mutação produz uma

“perturbação” no cromossomo que pode gerar novas características que não existiam em nenhum indivíduo da população.

- Geração – É uma iteração do AG onde indivíduos são selecionados para que sejam realizados o cruzamento e mutações, gerando descendentes. A cada geração tem-se uma nova população.
- 



a) Um ponto



b) Dois pontos

**Figura 17 – Tipos de Cruzamentos**

O AG padrão (GOLDBERG, 1989) trabalha da seguinte forma:

1. Um conjunto ou população de soluções iniciais, com  $i=1$  até o tamanho da população ( $n_{pop}$ ) é gerado;
2. A função objetivo  $f(\mathbf{X})$  e as restrições  $g(\mathbf{X})$  e  $h(\mathbf{X})$ , para cada indivíduo da população inicial são avaliadas e, posteriormente, as suas funções aptidão;
3. Estratégias de seleção são aplicadas à população selecionando indivíduos diretamente para a nova população ou geração (Elitismo) e para o cruzamento;
4. No cruzamento, os indivíduos selecionados são combinados aos pares de acordo com uma taxa de cruzamento, gerando descendentes ou filhos para a nova população;
5. Alguns indivíduos são selecionados para sofrerem mutações;

6. A nova população, se necessário, é completada com novos indivíduos gerados aleatoriamente;
7. Os passos (2) a (6) são repetidos até que um critério de parada seja atingido. Geralmente o critério de parada é dado por um número limite de gerações ou quando a taxa de variação da função aptidão não varia o suficiente conforme uma taxa pré-estabelecida.

Existe uma grande variedade de implementações de Algoritmos Genéticos, que se diferenciam, principalmente, pela representação das soluções, operadores utilizados, e avaliação da função aptidão. É devido a essa variedade de algoritmos existentes que se utiliza o termo no plural: Algoritmos Genéticos. Dizer “o algoritmo genético” tem sentido apenas quando se refere a uma implementação específica.

## 5 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

---

Dois modelos de otimização são apresentados neste capítulo. O primeiro para a otimização de uma torre cilíndrica tubular prismática, e o segundo para uma torre composta de segmentos tubulares tronco de cone. Os modelos diferenciam-se basicamente pelo modelo de análise.

### 5.1 MODELO DA TORRE CILÍNDRICA

No modelo inicial adotado, utilizou-se uma torre com seção tubular circular constante ao longo do seu comprimento, estando engastada na base e livre no topo. A torre é dividida em segmentos de mesmo comprimento, de tal forma que as dimensões de cada segmento sejam compatíveis tanto em tamanho como em peso com a sua capacidade de transporte e de montagem.

No processo de fabricação destes segmentos, inicialmente efetua-se a calandragem das chapas de aço. A calandragem é a conformação mecânica de uma chapa plana em um tubo. Em seguida, os tubos, que possuem a dimensão equivalente à largura das chapas utilizadas, são unidos através do processo de soldagem, formando os segmentos da torre. São efetuadas soldas tanto longitudinalmente como transversalmente. Neste modelo, considerou-se que as chapas de aço que compõe cada segmento, possuem a mesma espessura. Os segmentos são unidos através de flanges internos parafusados, de tal forma que as suas dimensões sejam compatíveis tanto em tamanho como em peso com a capacidade de transporte.

Considerou-se os esforços provenientes de uma carga axial de compressão, produzida pela massa do aerogerador,  $M_{nac}$ , localizado na extremidade superior da torre, e de uma carga trapezoidal  $w$  aplicada longitudinalmente na torre, proveniente da ação do vento, como discutido no item 3.1.1.

O objetivo deste primeiro modelo é verificar o comportamento do AG a ser utilizado, para tanto se busca uma torre eólica, segundo as exigências das normas brasileiras,

no menor peso possível, uma vez que para estruturas em aço, na maioria dos casos, o custo da torre está relacionado diretamente com o peso da estrutura.

As variáveis de projeto utilizadas foram o diâmetro médio, e as espessuras da seção transversal de cada segmento da torre. Para os diâmetros médios, foram consideradas variáveis do tipo contínuas, o que é assegurado pelo processo de calandragem na fabricação. Já para as espessuras de cada segmento, consideraram-se variáveis do tipo discretas, uma vez que as espessuras das chapas de aço dependem de suas disponibilidades comerciais.

Outras simplificações foram utilizadas no modelo, como a utilização da carga do vento de uma forma trapezoidal como já mencionado anteriormente, e não foi considerado o carregamento axial devido ao peso próprio da torre, apesar do peso próprio ser significativo, possuindo a mesma ordem de grandeza do aerogerador. Também não foram realizadas análises dinâmicas nem de fadiga nos componentes da torre.

Como restrições do problema, utilizaram-se as recomendações de segurança da NBR 8800 (2008) conforme descrito no Item 3.1.3

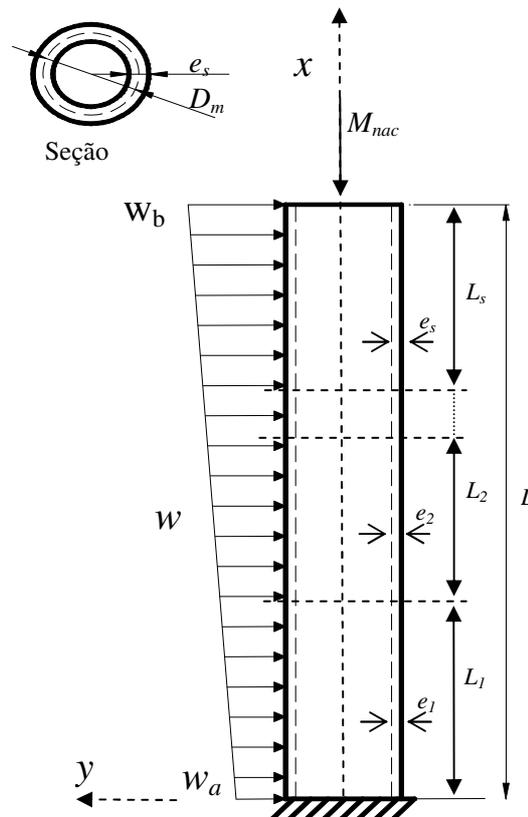


Figura 18 – Modelo de viga (Otimização)

A função objetivo sendo o peso é dada por:

$$P(X) = \gamma \pi D_m \sum_{k=1}^s L_k e_k \quad (39)$$

onde:  $\gamma$  é o peso específico do aço;  $s$  é o número de segmentos,  $L_k$  é o comprimento de cada segmento da torre,  $D_m$  é o diâmetro médio da seção transversal e  $e_k$  é espessura da parede de cada segmento da torre.

Foram considerados no modelo de otimização às seguintes restrições:

a) Restrição de deslocamento horizontal no topo da torre, dada por:

$$v - v_{max} \leq 0 \quad (40)$$

sendo,  $v$  o deslocamento horizontal máximo calculado no topo da torre e  $v_{max}$  o deslocamento horizontal máximo horizontal admissível. A NBR 8800 (2008) não possui nenhuma recomendação específica para deslocamentos máximos admissíveis para o caso de torres como no modelo proposto, porém, recomenda para edifícios, utilizar para deslocamentos horizontais no topo de pilares em relação a base, o valor de  $H/400$ , onde  $H$  é a altura do pilar. Outros limites têm sido usados na literatura para as torres.

b) Restrições referentes às verificações tanto dos critérios de resistência, quanto aos critérios das estabilidades global e local, são definidas para cada segmento por:

$$C_{comb_s} - 1 \leq 0 \quad (41)$$

Onde, sendo  $M_{sd,y} = 0$ ,  $C_{comb_s}$  é definido por:

$$C_{comb_s} = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} \right), \quad \text{para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (42)$$

$$C_{comb_s} = \frac{N_{Sd}}{2 \times N_{Rd}} + \left( \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} \right), \quad \text{para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (43)$$

- c) Restrição para verificação da relação entre o diâmetro da torre e a espessura de cada segmento, de tal forma que evite flambagem local, definida por:

$$F_{local_s} - 0,45 \frac{E}{f_y} \leq 0 \quad (44)$$

onde  $F_{local_s}$  é dado por:

$$F_{local_s} = \frac{D_m}{e_s} \quad (45)$$

- d) Restrição para verificação do cortante em cada segmento da torre é definido por:

$$\frac{V_{sd_s}}{V_{Rd_s}} - 1 \leq 0 \quad (46)$$

onde:

$$V_{Rd_s} = \frac{0,5 \tau_{cr} Ag}{\gamma_{a1}} \quad (47)$$

sendo  $\tau_{cr}$  definido pelas Equações (30) e (31).

Para o parâmetro da distância entre as seções de forças cortantes máximas e nulas ( $L_v$ ) exigida na Equação (30), foi utilizado o comprimento total da torre ao invés do comprimento de cada segmento. Isto devido ao modelo proposto não possuir forças cortantes nulas em seus segmentos, além desta consideração tornar-lo mais conservador.

Assim, podemos descrever o problema de otimização da torre cilíndrica como:

Minimizar:

$$P(X) = \gamma \pi D_m \sum_{k=1}^s L_k e_k \quad (48)$$

Sujeito às restrições:

$$\frac{v}{v_{max}} - 1 \leq 0 \quad (49)$$

$$C_{comb_s} - 1 \leq 0 \quad (50)$$

$$\frac{F_{local_s} \cdot f_y}{0,45 E} - 1 \leq 0 \quad (51)$$

$$\frac{V_{sd_s}}{V_{rd_s}} - 1 \leq 0 \quad (52)$$

$$\mathbf{X}_l \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_u \quad (53)$$

onde:

$\mathbf{X}$  é o vetor que contém as variáveis do projeto, definido por:

$$\{\mathbf{X}\}^T = \{D_m, e_1, \dots, e_s\} \quad (54)$$

$\mathbf{X}_l$  e  $\mathbf{X}_u$  são, respectivamente, os vetores contendo os limites inferiores e superiores das variáveis do projeto, onde o número de variáveis é igual ao número de segmentos mais um.

### 5.1.1 Implementação

Este modelo de otimização é implementado no software MATLAB®, que é uma linguagem computacional e que possui várias ferramentas implementadas, dentre elas, ferramentas de otimização.

O modelo da torre cilíndrica possui tanto variáveis do tipo contínuas, como variáveis do tipo discretas, além de possuir algumas restrições não-lineares. Além disso, a restrição relativa à segurança na forma das equações (42) e (43), apresenta descontinuidade para  $\frac{N_{sd}}{N_{rd}} = 0,2$ . Dessa forma, optou-se por resolver o modelo utilizando Algoritmos Genéticos.

Porém, a ferramenta de Algoritmos Genéticos do MATLAB® não trabalha com variáveis do tipo discretas. Dessa forma, implementou-se uma estratégia para resolver o problema. Utilizou-se uma lista contendo as espessuras das chapas encontradas comercialmente, sendo a posição na lista de cada espessura a variável de projeto do modelo para o AG.

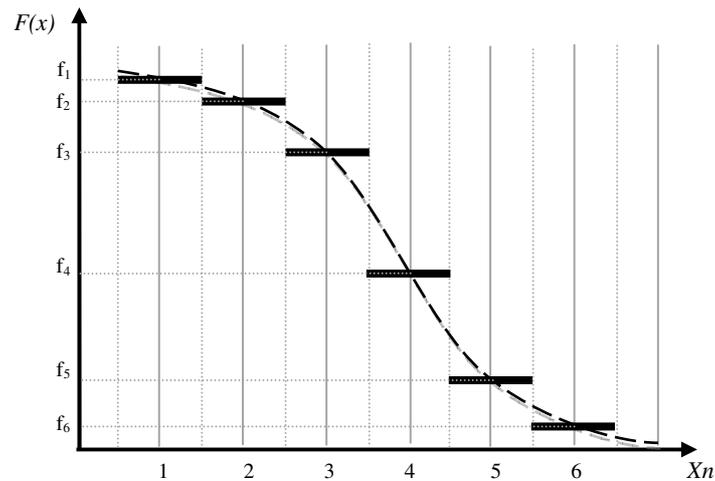
Assim, uma vez que o algoritmo gera uma variável correspondente à posição na lista da espessura da chapa (contínua), arredonda-se essa variável para o número inteiro mais próximo (posição na lista), e localiza-se o valor correspondente na lista (Tabela 9), utilizando esta espessura de chapa, para o cálculo da função objetivo e das restrições do problema.

Para garantir que essa estratégia confira a mesma probabilidade de escolha a todos os elementos da lista, estabeleceram-se o intervalo de busca variando de 0,5 a 13,5.

**Tabela 9 – Espessuras das Chapas**

<b>Posição</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1	2,00
2	2,65
3	3,00
4	4,75
5	6,30
6	8,00
7	9,50
8	12,50
9	16,00
10	19,00
11	22,40
12	25,40
13	31,50

Através deste artifício, a função objetivo do problema deixa de ser uma função contínua, e passa a ser uma função do tipo “degrau” (“*step-function*”), em termos da variável discreta na lista. A Figura 19 ilustra como se comporta a função objetivo ao se transformar uma determinada variável ( $X_n$ ) do tipo contínua em discreta.



**Figura 19 – Gráfico de uma função degrau**

Para os casos de existência de restrições não-lineares no problema de otimização, o MATLAB dispõe do Algoritmo Genético Lagrangiano Aumentado (ALGA - *Augmented Lagrangian Genetic Algorithm*).

O problema de otimização do ALGA é formulado da seguinte maneira:

Minimizar a função:

$$f(x)$$

sujeito a:

$$g_i(x) \leq 0, i = 1 \dots m$$

$$h_i(x) \leq 0, i = m + 1 \dots mt$$

$$[A] \cdot \{x\} \leq \{b\}$$

$$[A_{eq}] \cdot \{x\} = \{b_{eq}\}$$

$$\{X_l\} \leq \{x\} \leq \{X_u\}$$

onde,

$g(x)$  representa as restrições não-lineares de desigualdade;

$h(x)$  as restrições de igualdade;

$m$  é o número de restrições não-lineares de desigualdade;

$mt$  o número total de restrições não-lineares;

$[A]$  é a matriz dos coeficientes das restrições de desigualdade;

$[A_{eq}]$  é a matriz dos coeficientes das restrições de igualdade;

$\{X_l\}$  é o vetor contendo os limites inferiores das variáveis no problema;

$\{X_u\}$  é o vetor contendo os limites superiores das variáveis no problema.

O ALGA resolve um problema de otimização não-linear, com restrições não-lineares, restrições lineares e restrições laterais. As duas últimas são tratadas separadamente das restrições não-lineares. O ALGA formula um subproblema combinando a função aptidão e as funções das restrições não-lineares usando o Lagrangiano e parâmetros de penalidade. Assim, realiza uma otimização minimizando as funções através de Algoritmos Genéticos, de tal forma que as restrições lineares e laterais sejam satisfeitas.

O subproblema de otimização é definido como minimizar a função:

$$\theta(x, \lambda, s, \rho) = f(x) - \sum_{i=1}^m \lambda_i s_i \log(s_i - c_i(x)) + \sum_{i=m+1}^{mt} \lambda_i c_i(x) + \frac{\rho}{2} \sum_{i=m+1}^{mt} c_i(x)^2 \quad (55)$$

onde,

$\lambda_i$  são os multiplicadores de Lagrange;

$s_i$  são parâmetros não-negativos;

$\rho$  são parâmetros positivos de penalidade.

Assim, o Algoritmo Genético minimiza uma seqüência de subproblemas, os quais são uma aproximação do problema original. Quando o subproblema é minimizado para uma determinada tolerância pré-fixada e satisfaz as restrições, os multiplicadores estimados são atualizados. Caso contrário, as penalidades são aumentadas e um novo subproblema é criado e otimizado. Este ciclo é repetido até que os critérios de paradas sejam atingidos.

## 5.2 MODELO DA TORRE TRONCO DE CONE

O problema da torre cilíndrica prismática foi modelado face à sua simplicidade e com vista à avaliação do AG. O projeto das torres atuais mostra a tendência da composição de segmentos tronco de cone e até deste com segmentos cilíndricos (SEIDEL, 2003). O modelo de análise de vigas nestes casos não é apropriado.

Neste momento, buscou-se uma modelagem que retratasse de forma mais precisa as torres reais. Sendo assim, utilizou-se uma torre cilíndrica e cônica, promovendo um maior refinamento para que os resultados obtidos estivessem mais próximos da realidade. Dividiu-se a torre em segmentos de tronco de cone, para que o comprimento de cada segmento facilitasse tanto o transporte como a montagem da torre.

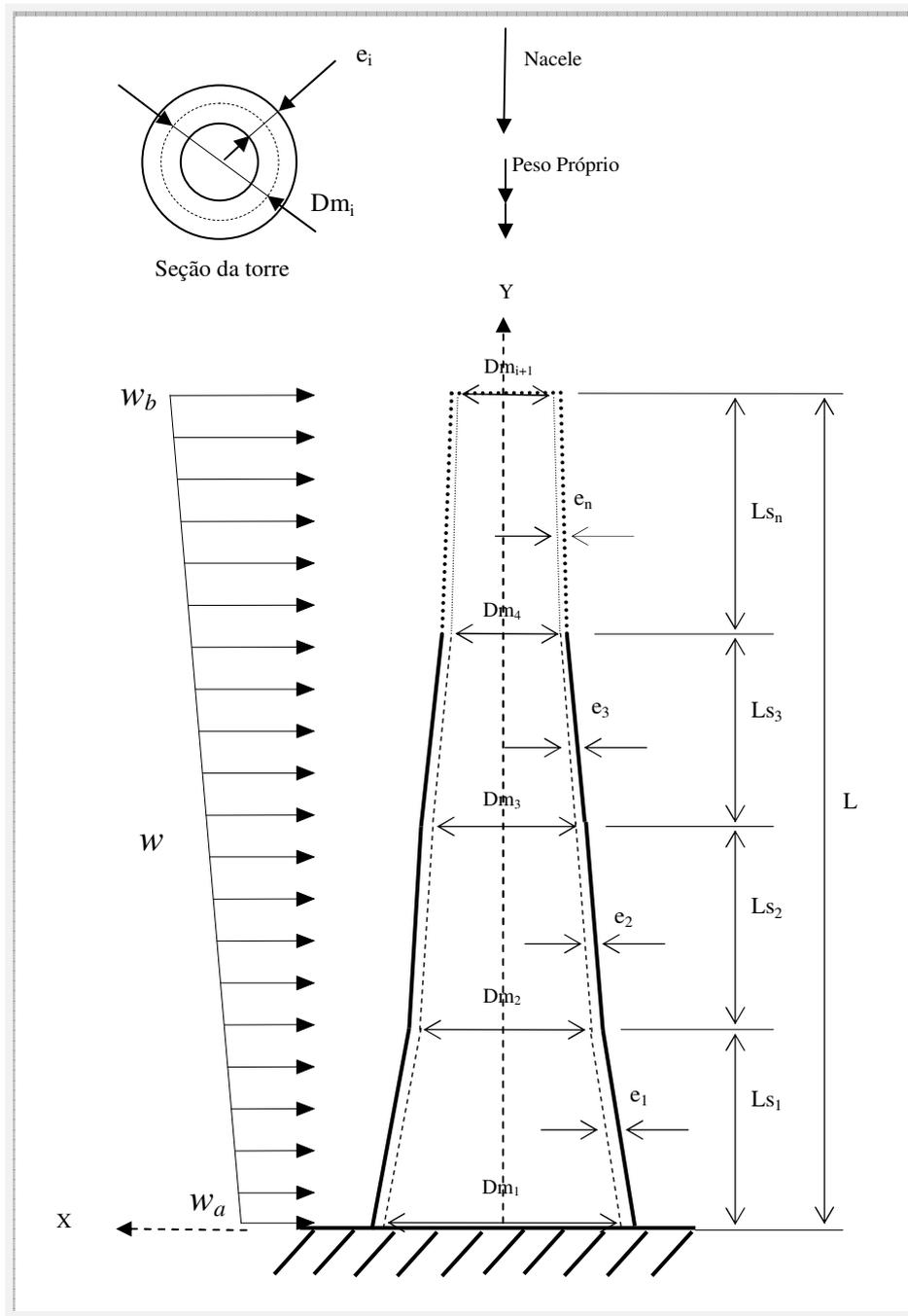


Figura 20 – Modelo da torre tronco de cone (Otimização)

Sujeitou-se a torre a uma carga axial de compressão devido à massa do aerogerador, aplicada na sua extremidade superior; a uma carga axial de compressão distribuída devido ao seu peso próprio; bem como a carga de vento obtida da consideração de uma pressão conforme mostrado em 3.2.

Para análise, utilizou-se um modelo de elementos finitos, tendo a base engastada e o topo livre, além de discretizar cada segmento em  $n$  elementos finitos. Formulou-se o modelo tendo como objetivo minimizar o peso da torre, utilizando como variáveis de projeto os diâmetros médios das seções transversais extremas de cada segmento de tronco de cone, e as respectivas espessuras de cada segmento. Para os diâmetros médios das seções transversais que interligam segmentos adjacentes, considerou-se uma única variável de projeto, evitando-se descontinuidades, conforme ilustrado na Figura 20.

No processo de fabricação destes segmentos, é realizado conforme descrito no modelo de torre cilíndrica, porém a calandragem produz tubos cônicos. Estes tubos cônicos são unidos através do processo de soldagem, formando segmentos da torre em forma de tronco de cone. As chapas de aço que compõe cada segmento possuem a mesma espessura, e o diâmetro das seções transversais inferior de cada segmento varia linearmente até o diâmetro da seção transversal superior.

Dessa forma, trataram-se os diâmetros médios das seções transversais superiores e inferiores de cada segmento como variáveis contínuas, e as espessuras de cada segmento como variáveis discretas, uma vez que dependem das disponibilidades das espessuras de chapas produzidas comercialmente.

Assim, definiram-se as variáveis de projeto da seguinte maneira:

$$\{X\}^T = \{Dm_1, Dm_2, Dm_3, \dots, Dm_{n+1}, e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\} \quad (56)$$

onde  $n$  é o número de segmentos.

A função objetivo é o peso dado por:

$$P(X) = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^{n_k} \gamma \pi Dm_j e_j \quad (57)$$

onde,  $\gamma$  é o peso específico do aço;  $Dm_j$  é o diâmetro representativo de  $j$ -ésimo elemento finito do segmento,  $e_j$  é espessura do  $j$ -ésimo elemento finito do segmento,  $s$  é o número de segmentos da torre e  $n_k$  é o número de elementos finitos do segmento  $k$ .

Estando o problema de otimização sujeito às seguintes restrições:

a) Restrição de deslocamento, definido por:

$$v - v_{max} \leq 0 \quad (58)$$

sendo,  $v$  o deslocamento horizontal máximo calculado no topo da torre e  $v_{max}$  o deslocamento horizontal máximo horizontal admissível;

b) Restrições referentes às verificações tanto dos critérios de resistência, quanto aos critérios das estabilidades global e local, analisadas para cada elemento finito ( $n$ ), definidas por:

$$C_{comb_n} - 1 \leq 0 \quad (59)$$

onde, sendo  $M_{sd,y} = 0$ ,  $C_{comb_n}$  é definido por:

$$C_{comb_n} = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} \right), \quad \text{para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (60)$$

$$C_{comb_n} = \frac{N_{Sd}}{2 \times N_{Rd}} + \left( \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} \right), \quad \text{para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (61)$$

c) Restrição para verificação da relação entre o diâmetro da torre e a sua espessura que garanta que não ocorra flambagem local, definida por:

$$F_{local_n} - 0,45 \frac{E}{f_y} \leq 0 \quad (62)$$

onde  $F_{local_n}$  é dado por:

$$F_{local_n} = \frac{Dm_n}{e_n} \quad (63)$$

d) Restrição para verificação do cortante, definido por:

$$\frac{V_{Sd_n}}{V_{Rd_n}} - 1 \leq 0 \quad (64)$$

onde:

$$V_{Rd_n} = \frac{0,5 \tau_{cr_n} A g_n}{\gamma_{al}} \quad (65)$$

sendo  $\tau_{cr_n}$  definido pelas Equações (30) e (31) para cada elemento finito ( $n$ ).

Assim, podemos descrever o problema de otimização da torre tronco de cone como:

Minimizar a função:

$$P(X) = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^{n_k} \gamma \pi D m_j e_j \quad (66)$$

Sujeito às restrições

$$\frac{v}{v_{max}} - 1 \leq 0 \quad (67)$$

$$C_{comb_n} - 1 \leq 0 \quad (68)$$

$$\frac{F_{local_n} \cdot f_y}{0,45 E} - 1 \leq 0 \quad (69)$$

$$\frac{V_{Sd_n}}{V_{Rd_n}} - 1 \leq 0 \quad (70)$$

$$X_l \leq X \leq X_u \quad (71)$$

onde:  $X$  é o vetor que contém as variáveis do projeto, definido por

$$\{X\}^T = \{Dm_1, Dm_2, Dm_3, \dots, Dm_{n+1}, e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\} \quad (72)$$

e,  $X_l$  e  $X_u$  são, respectivamente, os vetores contendo os limites inferiores e superiores das variáveis do projeto.

### 5.2.1 Implementação

Conforme efetuado no modelo de torre cilíndrica, neste modelo também se utilizou o software MATLAB® para otimizar o dimensionamento da torre.

Por se tratar de um modelo discretizado em elementos finitos, para efetuar a análise utilizou-se o programa SAEF (PARENTE, 2004), que é um programa de análise de elementos finitos, implementado no próprio MATLAB®.

Por este modelo possuir tanto variáveis contínuas como discretas, também foi utilizada a posição em uma lista com as espessuras das chapas como variáveis do problema.

Porém, no modelo anterior, comprovou-se que o Algoritmo Genético não trabalha muito bem em buscas localizadas. Quando o problema tende para a solução, devido à natureza contínua das variáveis e por efetuar um arredondamento para o inteiro mais próximo, o algoritmo executa muitas interações sem alterar a função objetivo.

Este problema é resolvido neste modelo se implementado dois códigos que substituem as funções de criação da população inicial e de mutação padrões da ferramenta de Algoritmos Genéticos do MATLAB®, que garantem na geração inicial e no processo evolutivo, a manutenção da natureza discreta das variáveis assim definidas.

O princípio adotado no que diz respeito às variáveis discretas é o seguinte: uma vez que a população inicial é gerada (pais), garante-se que ela possua apenas valores discretos para estas variáveis. Ao ser efetuado o cruzamento, obrigatoriamente os filhos desta população também serão do tipo discretas. Porém, também se faz necessário controlar a mutação para que ela não transforme as variáveis inicialmente discretas em contínuas.

É importante enfatizar, que no modelo em questão, os diâmetros iniciais e finais de cada segmento da torre, bem como a posição na lista das espessuras de cada segmento são as variáveis do problema de otimização. Assim, o artifício de controlar a forma como a

população inicial do problema é criada, bem como controlar a mutação para que gere apenas variáveis inteiras, é realizada somente nas variáveis correspondentes às espessuras dos segmentos da torre, não atuando nos diâmetros de cada segmento.

## 6 APLICAÇÕES

---

Foram realizadas aplicações para o modelo de torre cilíndrica, e para o modelo de torre tronco de cone. A aplicação no modelo de torre cilíndrica foi realizada com o intuito de se verificar a formulação, conforme descrita em 5.1, e o comportamento do algoritmo de otimização. Para o modelo de torre tronco de cone, buscou-se efetuar aplicações para torres mais realistas, considerando-se as torres compostas de múltiplos segmentos de troncos de cone conforme especificado em 5.2.

### 6.1 MODELO DA TORRE CILÍNDRICA

Para o modelo de otimização da torre cilíndrica, realizou-se uma aplicação para uma torre de 45 m de altura, composta de três segmentos de 15m para facilitar o transporte e a sua montagem, fabricada em aço estrutural ASTM A-36, com tensão de escoamento  $F_y = 250$  MPa. Para solução do problema de otimização, utilizou-se a ferramenta de Algoritmos Genéticos do MATLAB.

A torre está sujeita aos carregamentos provenientes do vento para o local de instalação (litoral do Ceará) e a um carregamento de compressão de 300 kN aplicado no topo, relativo à massa do conjunto rotor/nacele, semelhante à utilizada por BAZEOS *et.al.* (2002), com massa total de 25.000 kg. Foi considerado o valor de 0,1125 m como deslocamento horizontal máximo no topo da torre, equivalente à relação da altura da torre dividida por 400 ( $L/400$ ), conforme sugestão da NBR 8800 (2008). Os parâmetros gerais considerados em todas as aplicações estão listados na Tabela 10, e os dados do modelo de torre cilíndrica estão listados na Tabela 11.

Na determinação do carregamento do vento, tomou-se como velocidade básica 30,0 m/s, conforme indica o mapa das isopletras (NBR 6123, 1988). Para o coeficiente do Fator Topográfico,  $S_1$ , utilizou-se o valor de 1, correspondente a terrenos planos ou fracamente acidentados. Para  $S_2$ , utilizou-se a Categoria II, que corresponde a terrenos abertos aproximadamente em nível, e a Classe B, que está relacionada para edificações que possuem a

sua maior dimensão horizontal ou vertical entre 20 m e 50 m. Assim, através da Tabela 2, extraiu-se o valor correspondente a cada faixa de altura da torre. Para o Fator Estatístico  $S_3$ , considerou-se o Grupo 3, no qual estão enquadradas as instalações com baixo fator de ocupação, assumindo valor de 0,95. Na Tabela 12 estão indicados todos os parâmetros relativos às ações do vento. Suas velocidades e as pressões são determinadas conforme a Equação (1) e a Equação (3), respectivamente. Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

**Tabela 10 – Dados gerais utilizados nas aplicações**

Tensão de Escoamento ( $F_y$ )	250 MPa (ASTM A-36)
Módulo de Elasticidade	210 GPa
Peso Específico do aço:	78,50 kN/m <sup>3</sup>
Coeficiente de ponderação dos esforços solicitantes:	
• Permanente	1,25 (Desfavorável)
• Variável	1,40
Coeficiente de ponderação das resistências no estado limite último -	1,10

**Tabela 11 – Dados da torre cilíndrica**

Peso do Nacele:	300 kN
Altura da torre	45 m
Comprimento do segmento	15 m
Deslocamento máximo admitido no topo	0,1125 m

**Tabela 12 - Parâmetros do carregamento do vento**

$V_o$	30 m/s	
$S_1$	1	
$S_2(z)$	≤5	0,92
	10	0,98
	15	1,02
	20	1,04
	30	1,08
	40	1,11
	50	1,13
$S_3$	0,95	

**Tabela 13 - Resultados da ação do vento**

Altura (m)	Velocidade Característica do vento – $V_0$ (m/s)	Pressão característica – $q$ (N/m <sup>2</sup> )
≤5	$V_0 = 26,220$	$q = 421,43$
10	$V_0 = 27,930$	$q = 478,19$
15	$V_0 = 29,070$	$q = 518,02$
20	$V_0 = 29,640$	$q = 538,54$
30	$V_0 = 30,780$	$q = 580,76$
40	$V_0 = 31,635$	$q = 613,47$
50	$V_0 = 32,205$	$q = 635,78$

Na execução do algoritmo genético, é necessário que sejam definidos alguns parâmetros como: o tamanho da população, o número de gerações, e a taxa de cruzamento. Estes parâmetros foram estabelecidos a partir das aplicações realizadas, e estão indicados Tabela 14.

**Tabela 14 – Parâmetros do Algoritmo Genético**

População	20
Gerações	100
Tolerância relativa à função objetivo (TolFun)	1e-10
Tolerância relativa às restrições (TolCon)	1e-10
Elitismo	2
Taxa de cruzamento	0,80
Nº de gerações máxima permitidas sem haver melhoria (StallGen)	8

O parâmetro *População* indica quantos indivíduos terão na população. Já o parâmetro *Gerações*, indica a quantidade máxima de gerações que o algoritmo pode executar, uma vez que ele ainda não tenha encontrada uma solução ótima e terminada a execução através de outro critério de parada.

*TolFun* é uma tolerância para a função aptidão. O algoritmo continua executando a otimização enquanto uma variação acumulada da função aptidão seja maior que o *TolFun*. *TolCon* é a tolerância que indica o limite de quando uma restrição está viável ou não. O *Elitismo* indica a quantidade dos melhores indivíduos que são transferidos diretamente para a geração seguinte. A *taxa de cruzamento* indica a fração da população da próxima geração, não

incluindo os indivíduos selecionados pelo elitismo, que participaram do cruzamento. *StallGen* é um critério de parada que indica a quantidade de gerações na qual o algoritmo para quando não ocorre um melhoramento na função objetiva

Após várias execuções, observou-se que o algoritmo apresentou certa dificuldade de convergência. Observava-se que o AG apresentava soluções locais. Assim, realizou-se uma estratégia de efetuar um ciclo de execuções, para que o problema de otimização fosse processado várias vezes, de tal forma que a população de indivíduos resultante de uma solução otimizada, devido a certo critério de parada, fosse transferida como a população inicial da próxima iteração.

Através desta estratégia, conseguiu-se que o algoritmo evoluísse, e chegou-se a uma solução ótima apresentada na Tabela 15. A solução obtida apresentou somente uma restrição ativa, que foi a referente ao deslocamento no topo da torre, como pode ser observado na Tabela 16.

**Tabela 15 – Resultados – Torre cilíndrica**

<b>RESULTADOS</b>	
Massa	16.269,97 Kg
Diâmetro (X1)	1,725 m
Espessura 1 (X2)	16,00 mm
Espessura 2 (X3)	4,75 mm
Espessura 3 (X4)	4,75 mm

**Tabela 16 – Restrições – Torre cilíndrica**

<b>RESTRICÕES</b>	
Deslocamento	0,000
Flambagem local	-0,037
Resistência (Normal, Momento)	-0,569
Resistência (Cortante)	-0,915

## 6.2 MODELOS DAS TORRES TRONCOS DE CONE

Para os modelos de torres troncos de cone foram efetuados três aplicações distintas, variando alguns parâmetros como as alturas das torres, os números de segmentos, as massas dos aerogeradores além da magnitude das ações devido às forças do vento.

### 6.2.1 Torre Tronco de Cone 1

Na primeira aplicação do modelo de torre tronco de cone, considerou-se uma torre de 45 m de altura, composta de dois segmentos de 22,5 m de altura, conforme indicado na Tabela 17. A torre é fabricada em aço estrutural ASTM-A36, e os demais dados relativos à torre estão listados na Tabela 10.

Considerou-se um carregamento axial de compressão no topo da torre de 300 kN proveniente da massa do conjunto rotor/nacele, o peso próprio da estrutura, bem como a carga proveniente da ação do vento. Para a determinação da carga de vento foi utilizado o mesmo carregamento descrito em 6.1, cujos valores da velocidade e pressão características encontram-se listados na Tabela 13.

**Tabela 17 – Dados da torre tronco de cone 1**

Peso do Nacele:	300 kN
Altura da torre	45 m
Comprimento do segmento	22,5 m
Deslocamento máximo admitido no topo	0,1125 m

Cada segmento do modelo foi discretizado em 3 elementos finitos, totalizando 6 elementos para toda a torre. A aplicação do modelo foi realizada no software MATLAB, e para efetuar a análise e determinar os esforços solicitante bem como o deslocamento, utilizou-se o software SAEF (PARENTE, 2004). Os esforços resistentes de cálculo, e as verificações da norma, foram realizados para cada elemento finito, tomando-se o mais desfavorável como restrição do problema de otimização.

Utilizou-se a ferramenta de algoritmo genético do MATLAB para a otimização, e observou-se, para o problema descrito, uma dificuldade de convergência para um ótimo global. Então, utilizou-se a estratégia de efetuar um ciclo de otimizações, tomando a população resultante da solução de um ciclo como a população inicial do ciclo seguinte. Em conjunto com essa estratégia, utilizou-se um algoritmo de busca padrão combinado com o Algoritmo Genético. Assim, a partir do resultado que o AG apresenta, o algoritmo de busca padrão (*Pattern Search*) procura uma nova solução melhorada. A Tabela 14 apresenta os parâmetros do Algoritmo Genético utilizados e a Tabela 18 apresenta os resultados obtidos na otimização deste modelo de torre tronco de cone. A Tabela 19 lista o resultado das restrições da solução ótima encontrada.

**Tabela 18 – Resultados da Torre Tronco de Cone 1**

<b>RESULTADOS</b>	
Massa	11.080,796 Kg
Diâmetro 1 (X1)	3,107 m
Diâmetro 2 (X2)	1,098 m
Diâmetro 3 (X3)	1,000 m
Espessura 1 (X5)	8,00 mm
Espessura 2 (X6)	3,00 mm

Depois de realizada a aplicação do modelo de otimização, modelou-se a solução ótima obtida para a torre em um software de elementos finitos (ABAQUS). Utilizou-se um modelo de casca, e analisou-se o deslocamento e as tensões apresentadas. Através de análise linear observa-se que as tensões de Von Mises máximas no modelo são da ordem de 88 MPa, inferior à tensão de escoamento do aço utilizado (250MPa). O deslocamento no topo da torre (U1), como se pode conferir na Figura 21, foi da ordem de 0,12 m, o qual era esperado uma vez que a restrição de deslocamento encontra-se quase ativa.

**Tabela 19 – Restrições da Torre Tronco de Cone 1**

<b>RESTRICÇÕES</b>	
Deslocamento	0,0011
Flambagem local	-0,0458
Resistência (Normal, Momento)	-0,3564
Resistência (Cortante)	-0,9157

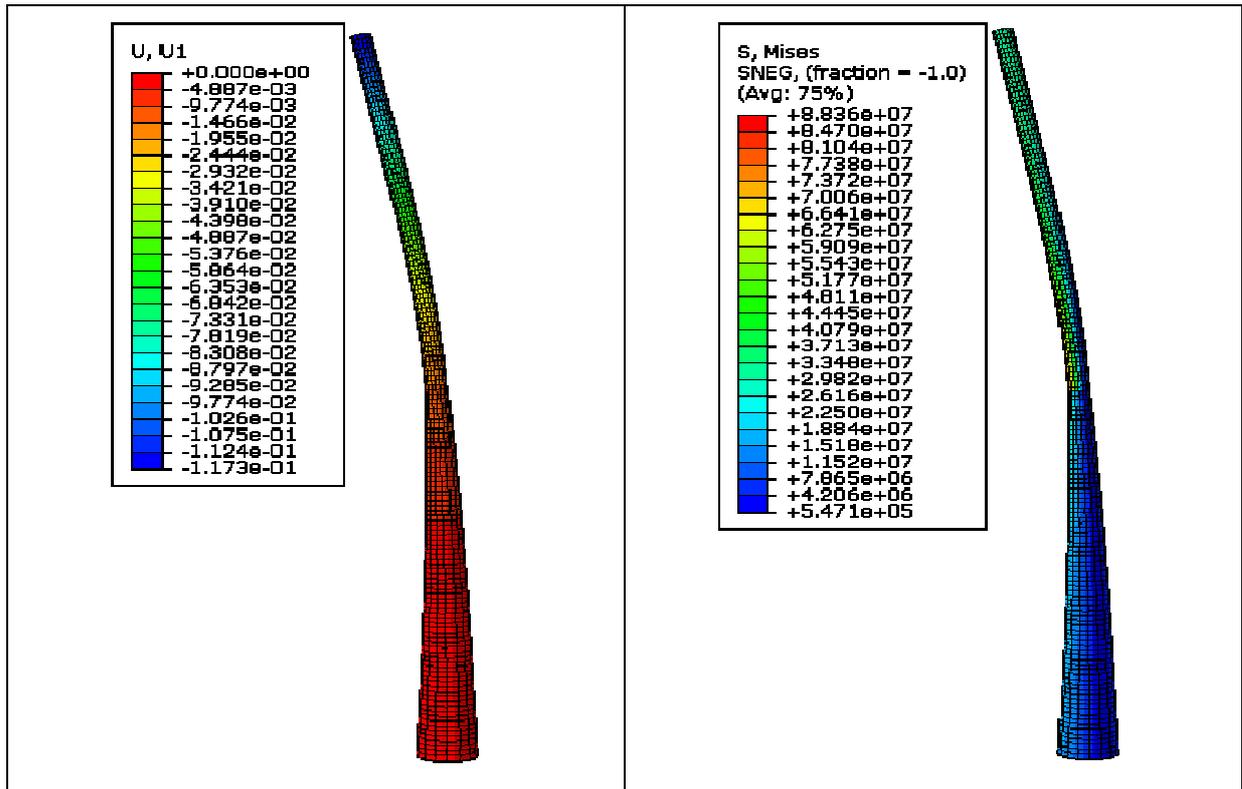


Figura 21 – Modelagem da solução ótima da Torre Tronco de Cone 1 em elementos de casca.

## 6.2.2 Torre Tronco de Cone 2

Na segunda aplicação do modelo de torre tronco de cone, tomou-se como referência o modelo anterior, mas com um número maior de segmentos. Assim, utilizou-se uma torre de 45 m de altura, composta de três segmentos de 15 m, conforme Tabela 20. Os demais dados utilizados encontram-se listados na Tabela 10.

Tabela 20 – Dados da torre cilíndrica

Peso do Nacele:	300 kN
Altura da torre	45 m
Comprimento do segmento	15 m
Deslocamento máximo admitido no topo	0,1125 m

Para o carregamento axial de compressão no topo da torre, proveniente da massa do conjunto rotor/nacele, também foi utilizado 300 kN. Foi considerado o peso próprio da

estrutura e as cargas provenientes da ação do vento conforme descrito em 6.1, cujos valores da velocidade e pressão características encontram-se listados na Tabela 13. Discretizou-se cada segmento em 3 elementos finitos e efetuou-se a aplicação conforme realizado no item 6.2.1. Os resultados obtidos para a Torre Tronco de Cone 2 estão listados na Tabela 21.

**Tabela 21 – Resultados obtidos para a torre tronco de cone 2.**

<b>RESULTADOS</b>	
Peso	9.119.98 Kg
Diâmetro 1 (X1)	2,2243 m
Diâmetro 2 (X2)	1,8071 m
Diâmetro 3 (X3)	1,0235 m
Diâmetro 4 (X4)	1, 0021 m
e1 (X5)	6,30 mm
e2 (X6)	6,30 mm
e3 (X7)	3,00 mm

Na modelagem da solução ótima obtida utilizando o software de elementos finitos (ABAQUS), conforme efetuado anteriormente, obtiveram-se tensões de Von Mises máximas no modelo da ordem de 60 MPa, inferior à tensão de escoamento do aço utilizado (250MPa) e obteve-se um deslocamento no topo da torre (U1) de 0,11m, conforme indicado na Figura 22. Este deslocamento era esperado uma vez que a restrição encontra-se próxima de estar ativa, como pode ser observado na Tabela 22 que lista o resultado das restrições da solução ótima encontrada.

**Tabela 22 – Restrições - Torre tronco de cone 2.**

<b>RESTRICÇÕES</b>	
Deslocamento	0,0006
Flambagem local	-0,0952
Resistência (Normal, Momento)	-0,5780
Resistência (Cortante)	-0,9383

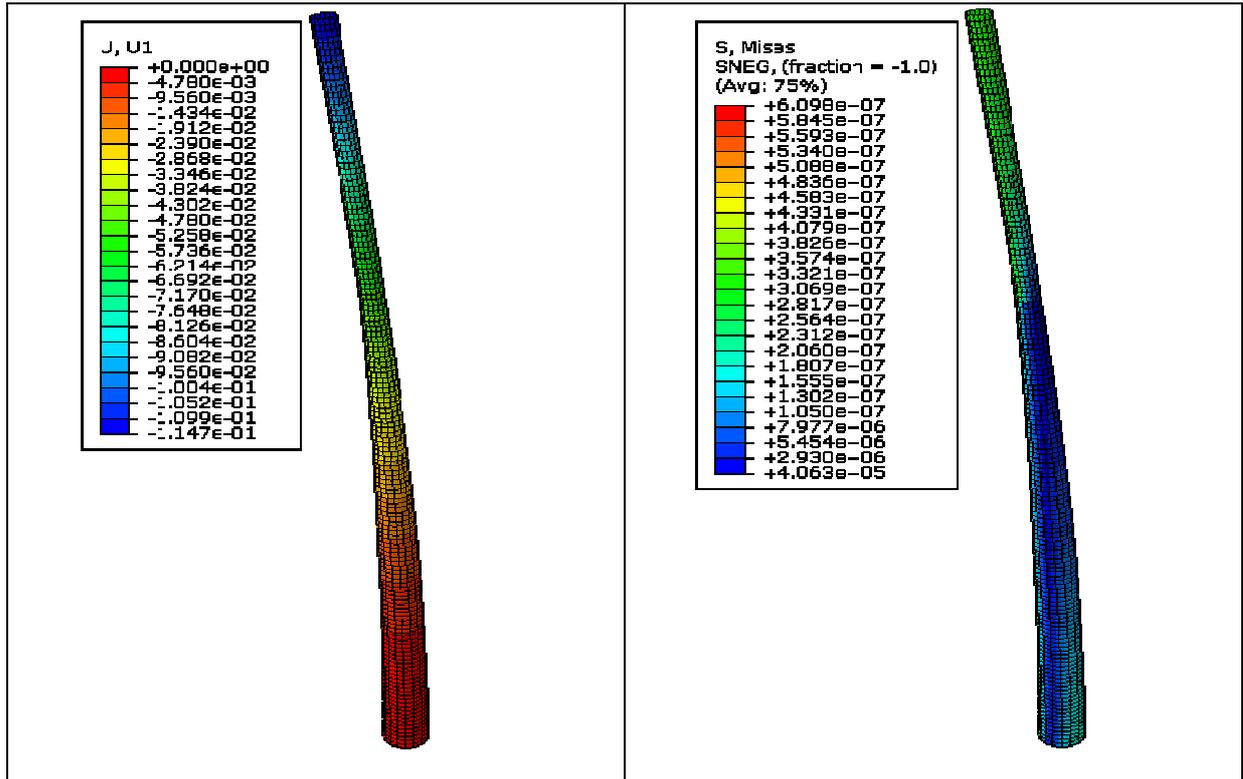


Figura 22 – Modelagem da solução ótima da Torre Tronco de Cone 2 em elementos de casca.

### 6.2.3 Torre Tronco de Cone 3

Depois de realizadas aplicações para modelos de torre com 45 m de altura, optou-se por efetuar uma aplicação para um modelo de torre tronco de cone com uma altura maior.

Assim utilizou-se uma torre de 60 m de altura, composta por três segmentos troncos de cone de 20 m, semelhante à utilizada nos modelos anteriores, com suas propriedades listadas na tabela 10.

Devido a sua maior altura, considerou-se um conjunto rotor/nacele mais potente, e conseqüentemente de maior massa, responsável por um carregamento de compressão de 500 kN aplicados no topo da torre. Os carregamentos devido as ações do vento seguiram as recomendações da NBR 6123 (1988). Para o Fator Topográfico,  $S_1$ , e o Fator Estatístico,  $S_3$ , foram utilizados os mesmos parâmetros descritos em 6.1. Para o fator  $S_2$ , utilizou-se a Categoria II, correspondente a terrenos abertos aproximadamente em nível, e a Classe C, que é relacionada para edificações que possuem sua maior dimensão horizontal ou vertical maiores que 50 m. A Tabela 24 lista os parâmetros relativos às ações do vento e a Tabela 25

apresenta a velocidade característica do vento ( $V_0$ ) e a pressão característica do vento ( $q$ ), dada pela Equação (1) e pela Equação (3), respectivamente.

**Tabela 23 – Dados da torre cilíndrica**

Peso do Nacele:	500 kN
Altura da torre	60 m
Comprimento do segmento	20 m
Deslocamento máximo admitido no topo	0,150 m

**Tabela 24 - Parâmetros do carregamento do vento**

$V_0$		30 m/s
$S_1$		1
$S_2(z)$	$\leq 5$	0,89
	10	0,95
	15	0,99
	20	1,02
	30	1,06
	40	1,09
	50	1,12
	60	1,14
$S_3$		0,95

**Tabela 25 - Resultados das ações dos ventos**

Altura (m)	Velocidade Característica do vento – $V_0$ (m/s)	Pressão característica – $q$ (N/m <sup>2</sup> )
$\leq 5$	$V_0 = 25,365$	$q = 394,39$
10	$V_0 = 27,075$	$q = 449,36$
15	$V_0 = 28,215$	$q = 488,01$
20	$V_0 = 29,070$	$q = 518,02$
30	$V_0 = 30,210$	$q = 559,45$
40	$V_0 = 31,065$	$q = 591,57$
50	$V_0 = 31,920$	$q = 624,58$
60	$V_0 = 32,490$	$q = 647,08$

Efetuuou-se a otimização do modelo no software MATLAB conforme realizado nos modelos anteriores e obtiveram-se os resultados listados na tabela 26 e as restrições listadas na Tabela 27. Observa-se que a restrição relativa ao deslocamento no topo da torre entra-se ativa.

**Tabela 26 – Resultados obtidos para a torre tronco de cone 3.**

<b>RESULTADOS</b>	
Peso	19.446,00 Kg
Diâmetro 1 (X1)	2,879 m
Diâmetro 2 (X2)	2,545 m
Diâmetro 3 (X3)	1,328 m
Diâmetro 4 (X4)	1,001 m
e1 (X5)	8,00 mm
e2 (X6)	6,30 mm
e3 (X7)	4,75 mm

**Tabela 27 – Restrições - Torre tronco de cone 3.**

<b>RESTRICÕES</b>	
Deslocamento	0,0000
Flambagem local	-0,0166
Resistência (Normal, Momento)	-0,6205
Resistência (Cortante)	-0,9399

Também foi realizada a modelagem no software ABAQUS do resultado obtido na otimização utilizando elementos de casca, e obteve-se para a tensão de Von Mises um valor na ordem de 53 MPa, conforme pode ser observado na Figura 23. Para o deslocamento no topo da torre, obteve-se um valor de 0,146 m, próximo ao valor esperado que era de 0,150 m, uma vez que a restrição do deslocamento encontra-se ativa.

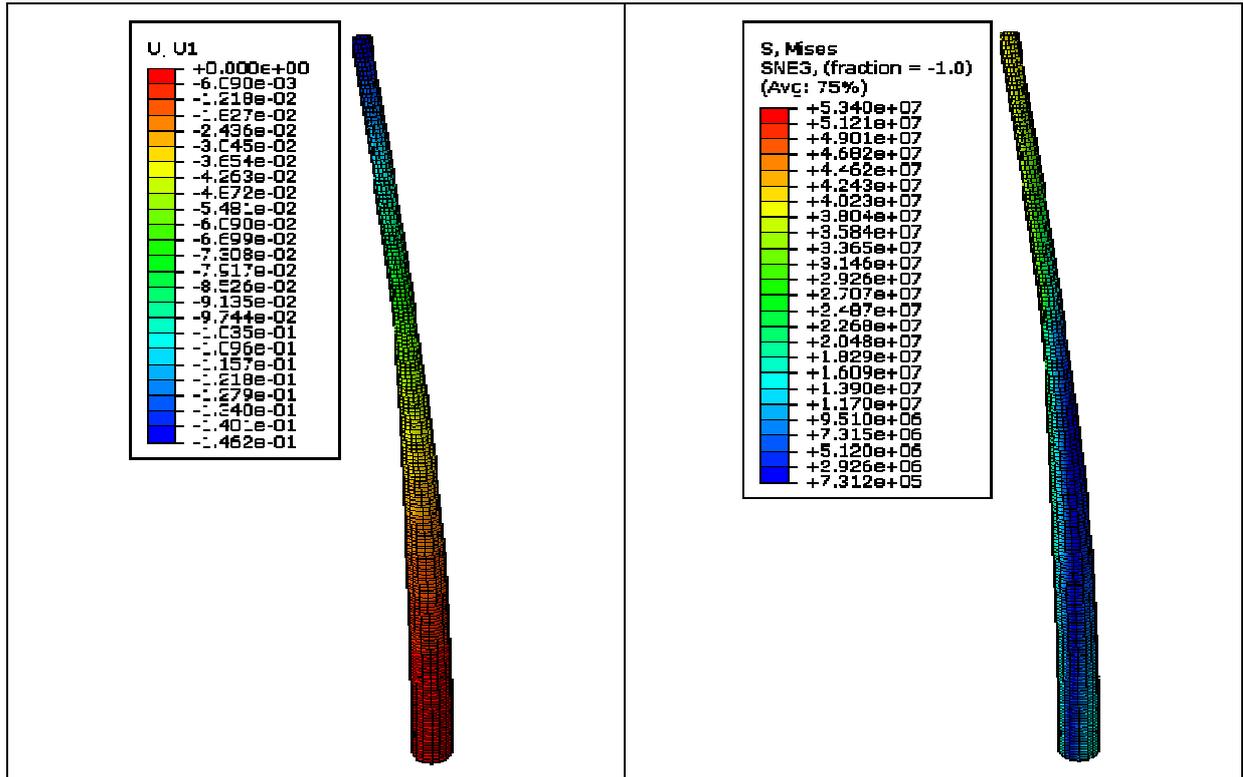


Figura 23 - Modelagem da solução ótima da Torre Tronco de Cone 3 em elementos de casca.

## 7 CONCLUSÃO

---

Este trabalho buscou realizar a otimização de torres de aço para geradores eólicos, utilizando as recomendações das normas brasileiras, uma vez que as torres correspondem cerca de 20% a 30% do seu custo, e que na revisão bibliográfica realizada não se conseguiu encontrar nenhuma referência de trabalhos que tenham utilizados a norma brasileira como parâmetro.

Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os aerogeradores, relatando a história de sua evolução, desde as primeiras adaptações de cata-ventos até os potentes modelos atuais. Descreveram-se os tipos de aerogeradores existentes bem como as principais partes que os compõem. Foram apresentados os principais tipos de torres utilizadas, apontado suas características, vantagens e desvantagens.

Foi realizada a otimização de dois modelos de torres eólicas. No primeiro foi considerado um modelo mais simplificado de uma torre cilíndrica, modelada como viga clássica, engastada na base e livre no topo. A torre estava sujeita a ação do carregamento do vento e de uma carga de compressão axial referente à massa do aerogerador. O segundo modelo trata-se de uma torre composta de segmentos de tronco de cone, onde foi discretizada em elementos finitos prismáticos de pórtico plano.

Para os dois modelos realizaram-se verificações de segurança baseados nos estados limites últimos e estado limite de serviço, e apresentaram-se os critérios de resistência recomendados pela NBR8800 (2008). Foram descritos os parâmetros necessários para que fossem determinadas as cargas de vento que atuam na estrutura segundo a NBR6123 (1988).

Devido a presença no problema de otimização de variáveis de natureza contínuas e discretas, utilizou-se Algoritmos Genéticos (AG's) que são baseados na simulação do processo de evolução natural de Darwin e em princípios da genética. Realizou-se uma apresentação das principais características dos AG's e descreveram-se os seus conceitos básicos.

Para a aplicação dos modelos foi utilizada a ferramenta de otimização de algoritmos genéticos do software MATLAB, realizadas estratégias para garantir a natureza mista das variáveis (contínuas e discretas) e para melhorar a convergência do problema.

Efetuu-se a aplicação de uma torre de aço de 45 m de altura, utilizando o modelo de torre cilíndrica, tendo como variáveis de projeto o diâmetro médio da torre e as espessuras das paredes de cada segmento.

Também foi realizada a otimização de três torres compostas por troncos de cone, duas de 45 m e uma de 60 m de altura, onde as variáveis de projeto utilizadas foram os diâmetros inferiores e superiores de cada segmento tronco de cone e as espessuras das suas respectivas paredes. Os resultados obtidos nas otimizações foram modelados no software ABAQUS como elementos finitos de casca e realizou-se as análises dos resultados.

O modelo de torre cilíndrica já sugeriu com a variação da espessura a tendência da forma cônica da solução ótima encontrada. O diâmetro superior tendeu ao valor mínimo de 1,00 m, necessário tanto para o acesso ao aerogerador como para o acoplamento da torre com o aerogerador. Foi observada uma redução do peso, inclusive inferiores aos da literatura, mas justificados pela não consideração de algumas restrições, como as relativas à vibração e à estabilidade da estrutura.

## **7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros, recomendo acrescentar novas considerações para os carregamentos da torre, como carregamento dinâmico e carregamentos provenientes do funcionamento do conjunto rotor/nacele. Tratar o custo como a função objetivo do problema de otimização, considerando os custos do material e de fabricação (corte, conformação, soldagem, pintura, etc).

Outra sugestão é a inclusão de novas variáveis de projeto, como por exemplo, o comprimento de cada segmento, a consideração da utilização de enrijecedores, variando suas quantidades e suas localizações. Também seria importante analisar a interação solo-estrutura, principalmente para solos típicos de dunas, onde a maioria das torres está sendo instaladas no nordeste brasileiro.

Sugere-se também a avaliação das frequências naturais de vibração da torre e a inclusão de restrições relativas a valores mínimos para estas grandezas. A consideração destas frequências também na função objetivo pode ser investigada.

É importante salientar que a norma NBR 8800 (2008) utilizada como referência principal no dimensionamento das torres apresentadas neste trabalho, não é uma norma específica para dimensionamentos de torres, apesar de ser a norma brasileira que mais se enquadra para o trabalho que foi realizado. Assim, sugere-se realizar um estudo entre normas e considerações estrangeiras, de forma que se obtenham recomendações para projetos que possam ser melhores enquadrados para aplicações brasileiras.

A utilização de outros algoritmos para a solução pode ser estudada

## 8 BIBLIOGRAFIA

---

ANEEL. Atlas da Energia Elétrica do Brasil - 2a. Edição. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.com.br>>. Acesso em: 02 abr. 2009.

ANEEL. Atlas da Energia Elétrica do Brasil - 3a. Edição. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.com.br>>. Acesso em: 02 abr. 2009.

ANEEL. BIG - Banco de Informações Gerais. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.com.br>>. Acesso em: 02 abr. 2009.

ARORA, J. S. **Guide to Structural Optimization**. New York: ASCE, 1997.

BAZEOS, N. et al. Static, seismic and stability analyses of a prototype Wind turbine steel tower. **Engineering Structures - Vol. 24**, 2002. 1015-1025.

BLESSMANN, J. **Ação do Vento em Edifícios**. [S.l.]: Editora da Universidade, 1989.

BRUGHUIS, F. J. Advanced tower solutions for large turbines and extreme tower heights. **Mecal Applied Mechanics BV**, 2003.

CARRERA, F. H. Estudo numérico para determinação das pressões devidas a ação do vento em torres metálicas de seção circular. **Universidade Estadual Paulista**, 2007.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Rio de Janeiro, RJ. 2001.

COOK, R. D. et al. **Concepts and applications of finite analysis. 4a. Ed.** Winsconsin: Wiley, 2002.

CRESESB. Energia Eólica - Princípios e Tecnologias. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**, 2010. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 2010.

DICLELI, M. Computer-aided optimum design of steel tubular telescopic pole structures. **Computer & Structures - Vol 62**, 1997. 961-973.

DWIA. Danish Wind Industry Association, 2009. Disponível em: <<http://www.windpower.org>>. Acesso em: 05 maio 2009.

GARY. 2000 Wat wind turbine. **New Wind-Water-Power.com**, 2010. Disponível em: <<http://wind-water-power.com/id17.html>>. Acesso em: 18 jul. 2010.

GHABOUSSI, J. Biologically inspired soft computing methods in structural mechanics and engineering. **Structural Engineering and Mechanics - Vol. 11**, p. 485-502, 2001.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

GRUBB, M. J.; MEYER, N. I. **Wind energy: resources, systems and regional strategies**.in Johansson, T.B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

HERBERT, G. M. J. et al. A review of wind energy technologies. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2007. 1117-1145.

HORVATH, G.; TOTH, L. New methods in wind turbine tower design. **Wind Engineering - Vol 25**, 2001. 171-178.

JÁRMAI, K.; SNYMAN, J. A.; FARKAS, J. Minimum cost design of a welded orthogonally stiffened cylindrical shell. **Computer & Structures**, 2006. 787-797.

LAVASSAS, I. et al. Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower. **Engineering Structures**, 2003. 1097-1106.

LAYTON, J. Como funciona a energia eólica. **Como tudo funciona**, 2010. Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>>. Acesso em: 01 ago. 2010.

NBR 6123. **Forças Devido ao Vento em Edificações**. [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

NBR 8681. **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. [S.l.]: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

NEGM, H. M.; MAALAWI, K. Y. Structural design optimization of wind turbine towers. **Computer & Structures**, 2000. 649-666.

OTDS. Lattice Towers. **Overhead transmission distribution systems**, 2010. Disponível em: <<http://www.otds.co.uk/lattice-towers.php>>. Acesso em: 25 jul. 2010.

PARENTE, E. Software: Sistema de Análise por Elementos Finitos (SAEF), 2004.

SAIT, S. M.; YOUSSEF, H. **Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering**. [S.l.]: IEEE, 1999.

SEIDEL, M. Experiences with two of the world's largest wind turbine towers. **EWEC - European Wind Energy Conf. and Exhibition**, 2003.

SIVAKUMAR, P. et al. Object-Oriented Optimization Approach Using Genetic Algorithms for Lattice Towers. **Journal of computing in civil engineering**, 2004. 162-171.

UYS, P. E. et al. Optimization of a steel tower for a wind turbine structure. **Engineering Structures - Vol. 29**, 2007. 1337-1342.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical optimization techniques for engineering design**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1984.

VENANZI, I.; MATERAZZI, A. L. Multi-objective optimization of wind-excited structures. **Engineering Structures**, 2007. 983-990.

VIEIRA, Á. L. Aerogeradores - Usinas Eólicas. **Aerogeradores**, 2010. Disponível em: <<http://alvaro.lima.vieira.50megs.com/aerogeradoresusinaeolicas.html>>. Acesso em: 30 jul. 2010.

VILARFORMOSO. Fórum Vilarformoso. **Vilarformoso**, 2010. Disponível em: <<http://www.vilarformoso/SMF/index.php/topic.1777.15.html>>. Acesso em: 30 jul. 2010.

WANG, Z. **Model-Based Design of an Ultra High Performance Concrete Support Structure for a Wind Turbine**. [S.l.]: Massachusetts Institute of Technology, 2007.

WINTERSTETTER, T. A.; SCHMIDT, H. Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading. **Thin-walled structures**, 2002. 893-909.

YOSHIDA, P. E. Wind Turbine Tower Optimization Method Using Genetic Algorithm. **Wind Engineering - Vol 30**, 2006. 453-470.