

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO ESTRUTURAL DE TORRES DE AÇO PARA  
AEROGERADORES

por

Augusto Furlanetto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO ESTRUTURAL DE TORRES DE AÇO PARA  
AEROGERADORES

por

Augusto Furlanetto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Herbert Martins Gomes

Coorientador: Prof. Felipe Schaedler de Almeida

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre, junho de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo incentivo e força que me transmitiram ao longo da graduação, além da educação que me deram ao longo dos anos. A minha namorada, por ser uma companheira fundamental para a conclusão dessa etapa da minha vida. Aos meus amigos, por todos momentos de alegria e descontração. Ao meu orientador, Prof. Herbert Martins Gomes, e ao meu coorientador, Prof. Felipe Schaedler de Almeida, por me passarem ensinamentos e instruções que tornaram possível a realização deste trabalho.

FURLANETTO, A. **Otimização do projeto estrutural de torres de aço para aerogeradores.** 2018. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **RESUMO**

A energia eólica vem se tornando uma das fontes alternativas de energia mais utilizadas nos últimos anos, devido ao seu caráter renovável e limpo. Nesse contexto de demanda crescente por novas instalações, um fator determinante para o sucesso do projeto é o custo envolvido em cada gerador eólico que compõe o parque. Um método de tornar o projeto mais viável do ponto de vista econômico consiste na diminuição do peso da torre do gerador eólico, e conseqüentemente no custo de material envolvido na construção. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a minimização do peso de uma torre de um gerador eólico sujeita à ação do vento, peso próprio e peso do conjunto rotor/nacele. É feito uso das normas NBR 6123, NBR 8681 e NBR 8800, relativas ao comportamento do vento, critérios de segurança e estruturas de aço, respectivamente. A otimização é realizada através da utilização do algoritmo metaheurístico QPSO, implementado via software MATLAB (2002). O problema estudado consiste em uma torre tubular, cujas variáveis de projeto são a sua espessura e o seu diâmetro. As restrições utilizadas são referentes a aspectos de resistência e deslocamentos normatizados. A carga do vento sobre a torre é analisada como uma força estática equivalente e a força transmitida pelo conjunto rotor/nacele à torre é considerada por um modelo simplificado. Melhorias substanciais na massa total da torre são obtidas com o uso do algoritmo QPSO. A metodologia desenvolvida é testada quanto à sua robustez por múltiplas reinicializações. Todas soluções otimizadas atendem aos critérios estabelecidos nas respectivas normas quanto à flambagem, e uma combinação de esforços através de curvas de interação para esforço normal, momento fletor, esforço cortante e esforço torçor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmo de Enxame de Partículas Quânticas, Aerogeradores, Otimização estrutural, QPSO.

FURLANETTO, A. **Optimization of the structural design of steel towers for wind turbines.** 2018. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **ABSTRACT**

Wind energy has become one of the most widely used alternative energy sources in recent years due to its clean and renewable character. In this context of increasing demand for new facilities, a determining factor for the success of the project is the cost involved in each wind generator that composes the wind park. One method of making the project economically viable is to reduce the weight of the tower of the wind generator, and consequently the total cost of the material involved in the construction. The objective of this work is the development of a methodology to minimize the weight of a tower of a wind generator subjected to wind action, dead weight and weight of the rotor / nacelle assembly. Use is made of the NBR 6123, NBR 8681 and NBR 8800 standards, regarding the behaviour of the wind and safety criteria for steel structures, respectively. The optimization is performed by the use of the metaheuristic algorithm QPSO, implemented in MATLAB, 2002, software. The problem studied consists of a tubular tower, whose design variables are their thickness and external diameter. The restrictions used refer to aspects of resistance and standardized displacements. The wind load on the tower is analysed as an equivalent static force and the force transmitted by the rotor / nacelle assembly to the tower is considered by a simplified model. Substantial improvements in the total mass of the tower are obtained using the QPSO algorithm. The developed methodology is tested for their robustness by multiple restarts. All the optimized solutions meet the constraint criteria established in the respective standards for buckling, and a combination of loads by through interaction curves for compression, bending moment, shear stress and torsion.

**KEYWORDS:** Quantum Particle Swarm Algorithm, Wind Turbines, Structural Optimization, QPSO.

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
3.1 Geradores eólicos .....	2
3.2 A Torre.....	3
3.3 As Pás.....	4
4. MODELAGEM NUMÉRICA .....	4
4.1 Método da Rigidez .....	4
4.2 Análise Modal.....	5
5. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	5
5.1 Algoritmo PSO .....	6
5.2 Algoritmo QPSO.....	6
5.2.1 Vantagem do QPSO sobre o PSO .....	6
6. CRITÉRIOS DE NORMA PARA PROJETO.....	7
6.1 Carregamento do vento.....	7
6.2 Combinação de carregamentos .....	7
6.3 Esforços combinados segundo a NBR 8800 .....	8
6.3.1 Força axial resistente de cálculo .....	9
6.3.2 Momento fletor resistente de cálculo .....	9
6.3.3 Força cortante resistente de cálculo.....	9
6.3.4 Momento de torção resistente de cálculo .....	10
6.4 Frequências Naturais .....	10
6.5 Deslocamento no topo .....	10
7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	10
7.1 Gerador eólico.....	10
7.2 Cálculo da Ação do vento na estrutura.....	11
7.3 Modelo de Otimização.....	12
7.4 Ações incidentes sobre a estrutura e combinações.....	12

7.5 Resultados .....	13
8. CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
APÊNDICES .....	16
ANEXOS .....	18

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Esquema de um aerogerador de 3 pás com indicação das principais partes estruturais. ....	3
Figura 3.2 - Densidades relativas e inércias equivalentes relativas para seção de pá de aerogerador WindPACT 1,5MW. (Malcolm <i>et al.</i> , 2007). ....	4
Figura 7.1 – Otimização da função objetivo.....	13
Figura 7.2 – Restrições de projeto do melhor indivíduo .....	14
Figura A1 – Gerador eólico discretizado.....	16
Figura A2 – Modos de vibração da torre.....	16
Figura A3- Vista interna e corte de uma pá típica de aerogerador e materiais empregados. (Vries, 2012).....	18
Figura A4 – (a) Composição da velocidade relativa na pá do aerogerador. (b) Esforços aerodinâmicos no sistema de coordenadas local do elemento de pá do aerogerador. (Jeong <i>et al.</i> ,2013) .....	18
Figura A5 – Coeficientes aerodinâmicos de acordo com o ângulo de ataque. (Gundtoft, 2009)	19



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Combinações de carregamento e Estados Limite.....	13
Tabela A1 - Valores do carregamento do vento.....	17
Tabela A2 - Resultados do carregamento do vento.....	17
Tabela A3 – Restrições da otimização. ....	17
Tabela A4 - Valores do coeficiente de arrasto.....	19
Tabela A5 - Espessuras comerciais de chapas de aço.....	19

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir da utilização do vento vem aumentando ao longo dos últimos anos e apresenta potencial para crescer ainda mais. Como prova desse crescimento, segundo o Atlas Eólico do Estado do Rio Grande do Sul, o estado possuía em 2014 o equivalente a 880 MW de potência instalada em usinas eólicas, sem contar os 1151,4 MW de usinas em construção ou implantação.

Com a crescente demanda por mais usinas eólicas e com a competitividade do mercado atual, um fator fundamental para o sucesso desses empreendimentos é o custo total do projeto. Nesse sentido, uma maneira de tornar o projeto mais barato é minimizar o peso da torre de um gerador eólico, diminuindo conseqüentemente a quantidade de material necessária para a fabricação.

A torre de um gerador eólico é um importante elemento estrutural, e como ela sustenta o conjunto rotor/nacele, uma eventual falha da torre pode causar a perda de todo gerador eólico. Desse modo, o presente trabalho emprega a análise recomendada pelas normas NBR 6123, 1998, NBR 8681, 2003 e NBR 8800, 2008, relativas ao comportamento do vento, critérios de segurança e estruturas de aço, respectivamente. A NBR 8800, 2008, é desenvolvida para o projeto de edifícios, e por falta de recomendações específicas para torres metálicas o presente trabalho faz uso da mesma, de maneira similar ao que é realizado na literatura.

Frente aos objetivos de buscar o menor custo de fabricação e a maior segurança estrutural, chega-se a uma contradição de quanto material é possível economizar sem que a torre perca sua confiabilidade. Diante disso, a metodologia do presente trabalho visa equilibrar estes dois fatores e buscar uma otimização na estrutura da torre de forma a minimizar o peso da torre e garantir a segurança estrutural da mesma.

Um método eficiente de realizar a otimização estrutural da torre de um gerador eólico é através da utilização de algoritmos computacionais, mais precisamente os algoritmos metaheurísticos, por resolverem problemas de otimização não linear. O presente trabalho faz uso do algoritmo *Quantum-behaved Particle Swarm Optimisation*, abreviado para QPSO. O QPSO surgiu em 2012 [Sun *et al.*, 2012] como um aprimoramento do algoritmo PSO e é baseado no comportamento de populações de pássaros e peixes e na mecânica quântica.

### 1.1 Motivação

O estudo da otimização na indústria de energia eólica, a fim de reduzir custos, é um tema que vem sendo bastante estudado atualmente. Um desses estudos diz respeito à minimização do peso de torres metálicas para aerogeradores. O peso da torre pode ser diminuído até um certo limite, que é definido pela rigidez estrutural necessária para que a estrutura resista a todos esforços incidentes sobre ela. Desse modo, a otimização com um algoritmo metaheurístico é uma forma eficiente de se ter uma busca pela melhor solução.

### 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo propor, implementar e testar uma metodologia de otimização do peso de uma torre metálica de um gerador eólico sujeita a ação do vento, peso próprio e peso do conjunto rotor/nacele, fazendo uso das normas NBR 6123, 1988, NBR 8681, 2003 e NBR 8800, 2008, relativas ao comportamento do vento, critérios de segurança e estruturas de aço, respectivamente. A otimização é feita através da utilização do algoritmo metaheurístico QPSO, implementado via *software* Matlab, 2002.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Yang, 2010, a maioria dos algoritmos metaheurísticos são baseados em comportamentos da natureza, que evoluiu ao longo de milhões de anos e encontrou a solução para quase todos os problemas que enfrentou. Os dois principais componentes dos algoritmos metaheurísticos são: seleção das melhores soluções e randomização. A seleção

das melhores soluções garante que a resposta irá convergir para a otimização, enquanto a randomização evita que a solução fique presa em um ponto ótimo local, possibilitando que o algoritmo encontre o ponto ótimo global do problema.

Segundo Sun *et al.*, 2012, o algoritmo de otimização por enxame de partículas, abreviado como PSO, é baseado no comportamento de voo coletivo dos pássaros e no cardume de peixes, ou seja, é um algoritmo que busca a solução ótima através da randomização de uma população de indivíduos. O algoritmo vem sendo utilizado em diversos ramos de pesquisa devido ao seu baixo custo computacional e fácil implementação. Entretanto, o PSO possui problemas de convergência para a solução ótima global. Por essa razão Sun *et al.*, 2012, desenvolveram uma versão aprimorada do algoritmo, denominada de QPSO, sigla que em inglês significa *quantum-behaved particle swarm optimisation*. O QPSO, como o nome sugere, é inspirado pela mecânica quântica e se comparado ao PSO tem menos parâmetros, taxa de convergência mais alta e maior robustez para problemas complexos.

O dimensionamento e a otimização de torres de geradores eólicos são temas que vêm sendo amplamente estudados, visto que a torre pode custar cerca de 20% a 30% do valor total de um gerador eólico [Yoshida, 2006] e tem uma grande importância como elemento estrutural. A utilização de algoritmos de otimização computacionais é uma maneira de realizar a otimização das torres, na busca pela minimização do peso da estrutura, levando em consideração os critérios de falha e normas de segurança.

Feijó, 2010, realizou a otimização do projeto de torres tubulares para geradores eólicos de aço levando em consideração duas formulações. A primeira considera uma torre cilíndrica prismática e a segunda considera uma torre composta de segmentos de troncos de cone. O objetivo do estudo foi obter o peso mínimo da torre, sujeita a restrições de rigidez, resistência e estabilidade de acordo com o especificado na norma NBR 8800, 2008. Em ambas formulações, as variáveis de projeto foram o diâmetro e a espessura de cada segmento da torre. Um algoritmo genético foi utilizado para a otimização e os resultados foram comparados com soluções da literatura.

Um modelo de otimização de torres tubulares de aço para geradores eólicos foi formulado por Santos, 2013. No estudo, buscou-se a minimização do volume total, tendo como variáveis de projeto as espessuras da parede da torre. A torre foi sujeita às restrições referentes à frequência natural, tensão e deslocamento máximo, segundo as normas NBR 8800, 2008 e Eurocode 3, 2006. O estudo considera o peso do aerogerador (rotor/nacele), o peso próprio da torre e o efeito estático da carga do vento. Os detalhes construtivos da torre, como abertura e ligações, foram considerados na modelagem do problema. A otimização foi feita utilizando o módulo de otimização do programa ANSYS e aplicaram-se os métodos de aproximação por subproblemas e de primeira ordem. Utilizou-se no estudo um modelo de torre comercial e os resultados obtidos levaram à uma redução no volume total da torre.

Dumby, 2014, propôs um procedimento de análise para o dimensionamento de torres tubulares de aço para geradores eólicos, levando em conta as normas Europeias. O estudo aborda o projeto da torre tendo em vista a estabilidade e a fadiga, e considera as ligações no dimensionamento da mesma. Faz-se uma diferenciação e comparação entre ligações por flange e ligações por atrito. É realizado um exemplo numérico de uma torre de 80 metros, utilizando o programa Mathcad. Neste exemplo, são considerados os esforços referentes ao peso próprio da torre, peso do conjunto rotor/nacele e a ação do vento que incide tanto na torre quanto nas pás do rotor.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Geradores eólicos

Os aerogeradores podem ser classificados em dois tipos, de acordo com a posição do eixo do rotor. Os aerogeradores de eixo vertical não dependem da direção do vento e seu uso é aconselhado em regiões urbanas ou semiurbanas por apresentar baixo ruído. Os aerogeradores de eixo horizontal são mais eficientes que os de eixo vertical, porém dependem

da direção do vento, e por isso possuem um sistema que rotaciona o rotor para captar a direção predominante do vento.

Dentre os aerogeradores de eixo horizontal, faz-se ainda distinção de acordo com o número de pás do rotor, podendo ter 2, 3 ou múltiplas pás. Os rotores de múltiplas pás possuem baixa potência, limitada pela área do seu rotor. Por se mostrarem mais eficientes e apresentarem uma grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor, os aerogeradores de eixo horizontal com 2 ou 3 pás são os mais utilizados atualmente.

Outro elemento fundamental para o funcionamento de um aerogerador é a nacele, uma espécie de alojamento que fica no topo da torre e abriga alguns componentes essenciais para a produção de energia, além de servir de acoplamento para o rotor. Dentre os elementos situados no interior da nacele estão o gerador elétrico, a caixa amplificadora, o sistema de freio, o sistema de transmissão, entre outros.

O presente trabalho realiza a otimização de uma torre, considerando um aerogerador de eixo horizontal com 3 pás, como o exemplificado na Figura 3.1, a qual indica de maneira ilustrativa, os principais componentes deste modelo de aerogerador.

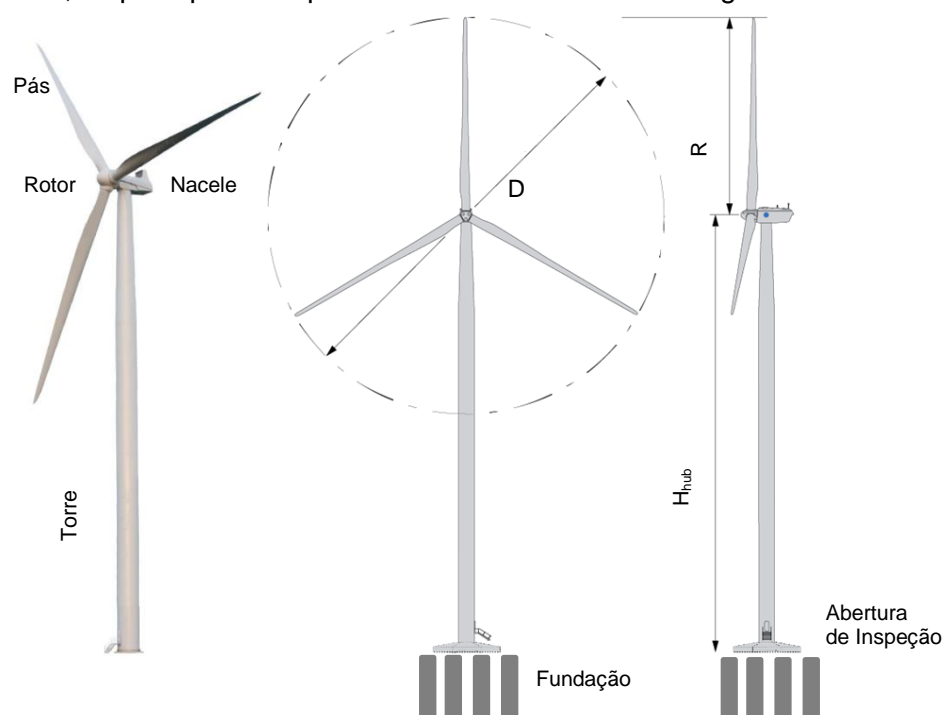


Figura 3.1- Esquema de um aerogerador de 3 pás com indicação das principais partes estruturais.

### 3.2 A Torre

As torres de aerogeradores de eixo horizontal possuem geralmente uma configuração tubular, podendo ser construídas tanto em aço como em concreto. A maioria das torres é fabricada em aço, com segmentos tubulares cônicos que variam de 15 a 30 metros de comprimento, sendo os ditos segmentos conectados por flanges nas extremidades e parafusados internamente. A divisão em segmentos é feita para facilitar o transporte e a instalação da torre no local do parque eólico.

A torre tem a função de prover sustentação ao gerador eólico e para isso ela precisa possuir robustez suficiente para suportar os esforços causados pelo vento, o peso do conjunto rotor/nacelle, força de empuxo e desbalanceamento quando em funcionamento bem como o seu peso próprio.

Para garantir a viabilidade econômica do parque eólico, é desejável reduzir o peso da torre, e com isso o custo de material necessário para fabricá-la. No entanto, a redução de material tem como consequência a diminuição da rigidez da estrutura. Nesse contexto, o

papel da otimização da torre é garantir que se utilize a menor quantidade de material possível de modo que o gerador eólico respeite os critérios de segurança e não apresente falhas estruturais.

### 3.3 As Pás

Para analisar corretamente o gerador eólico, as pás do rotor devem ser modeladas adequadamente, visto que uma parcela considerável dos esforços atua sobre as mesmas. As pás de aerogeradores comerciais geralmente são de materiais compostos com resina de poliéster reforçados com fibra de vidro (GRFP). Além disso, as pás têm um perfil aerodinâmico de forma a melhorar a performance na captação da energia do vento (maior relação  $c_l/c_d$ ). A Figura A3 mostra um corte de uma pá típica onde indicam-se os materiais utilizados e as seções transversais, as quais variam ao longo do comprimento da pá.

Para simulações simplificadas, as propriedades mecânicas da pá podem ser avaliadas em cada seção da pá, de forma a obter um modelo compatível em termos de rigidez e massa para avaliação de deslocamentos e frequências naturais. Isto se faz com aproximações que igualam estas propriedades às de uma seção equivalente de viga [Rodríguez *et al.*, 2007, Malcolm *et al.*, 2007 e Ashuri *et al.*, 2010]. Para uma pá modelo WindPACT 1.5MW (R=35m), tem-se um gráfico como o indicado na Figura 3.2, onde as rigidezes na direção dos bordos e perpendicular, e rigidez torsional, assim como densidade, são dadas em função destes parâmetros na raiz da pá e da distância adimensional. Sabendo-se as informações na raiz da pá, podem-se obter as informações do restante da pá. O presente trabalho faz uso da aproximação citada anteriormente para modelar, de maneira simplificada, as pás do gerador eólico.

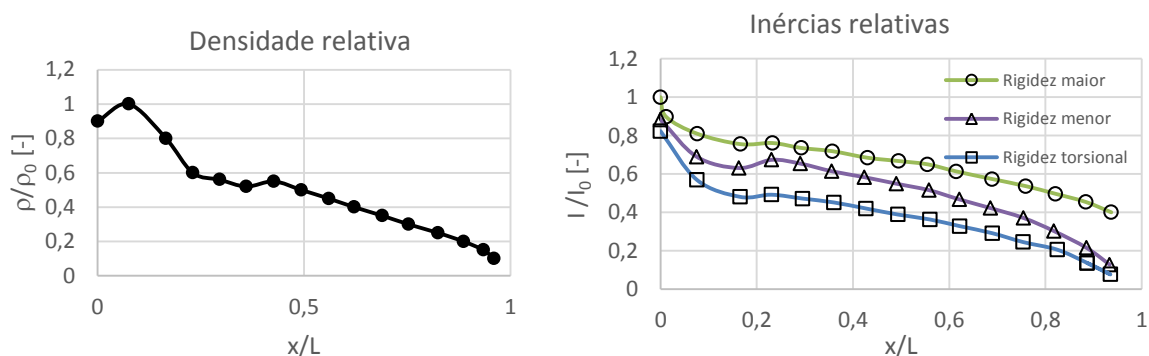


Figura 3.2 - Densidades relativas e inércias equivalentes relativas para seção de pá de aerogerador WindPACT 1,5MW. (Malcolm *et al.*, 2007).

## 4. MODELAGEM NUMÉRICA

### 4.1 Método da Rigidez

Para a simulação numérica, a torre do gerador eólico foi modelada como um pórtico espacial. Este tipo de modelagem permite determinar momentos fletores e torçores, esforços cortantes e normais de todos os elementos. Os elementos de pórtico espacial são utilizados para avaliar deslocamentos e deformações na estrutura, os quais possuem 6 graus de liberdade por nó, sendo 3 para as translações nos eixos principais e 3 para as rotações em torno desses mesmos eixos.

Através do método da rigidez, é resolvido um sistema de equações que determina incógnitas do problema, como deslocamentos, reações e esforços solicitantes em cada nó. A partir de equações constitutivas e de compatibilidade, é expresso o comportamento individual de cada barra. Uma vez obtida a matriz de rigidez, é feita a adequação do sistema local dos elementos com o sistema global de equações de equilíbrio pela rotação da mesma. A matriz de rigidez no sistema global  $[K_e]$  de um elemento é definida como [Ferreira, 2009]:

$$[K_e] = [R]^T [k] [R] \quad (4.1)$$

onde  $[K_e]$  é a matriz de rigidez no sistema global do elemento,  $[R]$  é a matriz de rotação e  $[k]$  a matriz de rigidez em coordenadas locais. Para a obtenção da matriz global  $[K]$  da estrutura procede-se à superposição das matrizes  $[K_e]$  de cada barra, utilizando-se a numeração dos graus de liberdades efetivos. O sistema de equações de equilíbrio para barras de pórticos espaciais pode ser escrita como:

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (4.2)$$

onde  $[K]$  é a matriz de rigidez global da estrutura,  $\{U\}$  é o vetor de deslocamento nodal e  $\{F\}$  o vetor das forças externas aplicadas aos nós.

## 4.2 Análise Modal

Para a verificação das frequências naturais e modos de vibração do aerogerador, é feita uma análise modal da estrutura. A partir da análise modal é possível determinar as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Esta análise é fundamental no estudo de geradores eólicos, visto que os mesmos podem estar sujeitos a vibrações excessivas que podem levar à fadiga dos componentes. A matriz de massa para o elemento é avaliada de acordo com a formulação consistente para barras de pórticos espaciais. A partir da expressão da energia cinética associada ao elemento, obtém-se a matriz de massa consistente para o sistema global:

$$[M_e] = [R]^T [m] [R] \quad (4.3)$$

onde  $[M_e]$  é a matriz consistente do elemento em coordenadas globais,  $[R]$  é matriz de rotação e  $[m]$  a matriz de massa consistente em coordenadas locais. Uma vez obtida a matriz de rigidez global e a matriz consistente de massa, pode-se computar as frequências naturais e modos de vibração do sistema a partir da solução do problema de autovalores e autovetores [Ferreira, 2009]:

$$([K] - \omega^2 [M])\{\varphi\} = \mathbf{0} \quad (4.4)$$

onde  $\omega$  é a frequência natural de vibração (rad/s) e  $\{\varphi\}$  é o vetor dos modos naturais de vibração.

## 5. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Na otimização procuram-se soluções para variáveis que tornem uma função objetivo mínima ou máxima. Uma função de  $n$  variáveis a ser minimizada pode ser especificada conforme [Arora, 1989]:

$$\begin{aligned} \text{Minimize:} & \quad f(X) \\ \text{Sujeito a:} & \quad \varnothing_j(X) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J) \\ & \quad \varphi_k(X) \leq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \\ \text{Tal que:} & \quad X \in [X_{\min}; X_{\max}] \end{aligned} \quad (5.1)$$

onde  $f(X)$  é a função objetivo a ser otimizada,  $\varnothing_j(X)$  são as  $J$  funções de restrição de igualdade,  $\varphi_k(X)$  são as  $K$  funções de restrição de desigualdade e  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  é o vetor das  $n$  variáveis de projeto, sendo os limites inferiores e superiores definidos por  $X_{\min} = (x_{\min,1}, x_{\min,2}, \dots, x_{\min,n})^T$  e  $X_{\max} = (x_{\max,1}, x_{\max,2}, \dots, x_{\max,n})^T$ , respectivamente, e que podem ser contínuos, discretos ou uma mistura de ambos [Rao, 2009].

No caso da otimização estrutural, a função objetivo geralmente é a massa ou o custo monetário e as funções de restrição dizem respeito a critérios de projeto, como frequências naturais e esforços sobre a estrutura. O processo de otimização encerra-se quando a função objetivo atinge um valor mínimo (ou máximo) que satisfaça todas as funções de restrição simultaneamente.

## 5.1 Algoritmo PSO

Em 1995, Kennedy e Eberhart fizeram um progresso significativo no campo dos algoritmos metaheurísticos ao criarem o PSO, ou *Particle Swarm Optimisation*. Este algoritmo é inspirado na inteligência conjunta de peixes e pássaros. As partículas rondam o espaço de procura da função objetivo a partir de um ponto inicial aleatório. A partícula que encontra o melhor ponto, ou seja, aquele que minimiza ou maximiza a função objetivo, compartilha este ponto com as outras partículas, a fim de encontrar o ponto ótimo global.

O PSO realiza a procura ajustando a trajetória individual de cada partícula. O movimento da partícula consiste de dois componentes: um componente estocástico e um componente determinístico. Cada partícula é atraída para o ponto ótimo global e para o seu próprio ponto ótimo, ao mesmo tempo em que ela tende a mover-se randomicamente.

Quando a partícula encontra um ponto que é melhor do que os locais anteriormente encontrados, ela atualiza o novo ponto como sendo o seu ponto ótimo. Portanto existem  $n$  pontos ótimos para  $n$  partículas. O objetivo é encontrar o ponto ótimo global dentre todos os  $n$  pontos até que a função objetivo não mais melhore após um certo número de iterações.

## 5.2 Algoritmo QPSO

O QPSO é uma importante variação do PSO, motivado pela mecânica quântica e análise da trajetória em que o estado de cada partícula ( $x$ ) pode ser descrita por uma função de onda  $\Psi(x)$ . A probabilidade de se encontrar a partícula em determinada posição pode ser descrita pela função densidade de probabilidade,  $Q(x)$ .

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{-\frac{|p-x|}{L}} \quad (5.2)$$

$$Q(x) = |\Psi(x)|^2 = \frac{1}{L} e^{-\frac{2|p-x|}{L}} \quad (5.3)$$

Dada a distribuição de probabilidade, utilizando o método de simulação estocástico de Monte Carlo, a posição da partícula pode ser obtida pela equação estocástica (Sun *et al.* (2012):

$$x = p + \frac{L}{2} \ln(1/u), \quad u \sim U(0,1) \quad (5.4)$$

onde  $p$  é uma variável randômica expressa pela Equação (5.5). O parâmetro  $L$  caracteriza a “criatividade” ou “imaginação” da partícula, descrita pela Equação (5.6).

$$p = \varphi P + (1 - \varphi)G, \quad \varphi \sim U(0,1) \quad (5.5)$$

$$L = 2\alpha|x - mbest| \quad (5.6)$$

onde  $P$  e  $G$  representam a melhor experiência da partícula e do enxame, respectivamente. O parâmetro  $\alpha$  é conhecido como coeficiente de expansão e contração e decresce linearmente de um valor inicial  $\alpha_{inicial}$ , atingindo um valor final  $\alpha_{final}$  ao completar todas as iterações  $n_{iter}$ . Este é um importante parâmetro para a dinâmica das partículas e convergência do algoritmo. O  $mbest$  é a média da melhor posição de cada partícula do enxame de  $N_p$  indivíduos e pode ser expressa como:

$$mbest = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} P_i, \quad (5.7)$$

A expressão de atualização da nova posição da partícula  $i$ , na dimensão  $j$  na  $n$ -ésima iteração fica, portanto:

$$x_{i,n+1}^j = p_{i,n}^j \pm \alpha |mbest_n^j - x_{i,n}^j| \ln(1/u_{i,n+1}^j), \quad u \sim U(0,1) \quad (5.8)$$

### 5.2.1 Vantagem do QPSO sobre o PSO

A utilização da mecânica quântica, expressa através de equações como a função de onda, por exemplo, permite ao QPSO superar alguns obstáculos encontrados pelo algoritmo PSO original. Primeiro, o sistema quântico utilizado pelo QPSO apresenta um estado de incerteza, o que significa que uma partícula do sistema pode aparecer em qualquer posição, de acordo com uma determinada distribuição de probabilidade.

Segundo, as partículas no PSO apresentam-se num estado de ligação entre elas, para garantir a coletividade do enxame. Essa propriedade permite que o algoritmo convirja para um ótimo, porém limita o espaço de procura. No QPSO, uma partícula pode aparecer em qualquer posição de um determinado espaço de procura com uma certa probabilidade, até mesmo em uma posição longe do ponto ótimo global. Essa nova posição pode ser inclusive melhor que o atual ponto ótimo global.

As propriedades supracitadas oferecem ao QPSO uma robustez maior em problemas mais complexos, por impedir que o algoritmo fique preso em um ponto ótimo local, ou ainda por tornar o espaço de procura mais amplo.

## 6. CRITÉRIOS DE NORMA PARA PROJETO

### 6.1 Carregamento do vento

Os esforços causados pelo vento sobre o aerogerador foram calculados de acordo com o procedimento disposto na NBR 6123, 1988, considerando a ação do vento como um carregamento estático equivalente atuando ao longo da estrutura.

As forças estáticas devido ao vento são determinadas a partir da velocidade característica do vento  $V_k$ , como segue:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (6.1)$$

onde  $V_0$  é a velocidade básica do vento;  $S_1$  é o fator topográfico;  $S_2$  é um fator que leva em conta a rugosidade do terreno, dimensões da estrutura e altura sobre o terreno;  $S_3$  é o fator estatístico. Os fatores supracitados são determinados de acordo com a NBR 6123, 1988.

A partir da velocidade característica do vento, é possível determinar a pressão característica do vento  $q$ , conforme a seguinte equação:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (6.2)$$

Após a obtenção da distribuição de pressão sobre a estrutura, chega-se na força de arrasto causada pelo vento, segundo a equação abaixo:

$$F_a = C_a q A_e \quad (6.3)$$

onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto e  $A_e$  é a área frontal projetada efetiva.

### 6.2 Combinação de carregamentos

As verificações de segurança foram baseadas em critérios estabelecidos pelas NBR 8800, 2008 e NBR 8681, 2003, que consideram os estados-limites últimos (ELU) e os estados-limites de serviço (ELS). Os estados-limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil. Já os estados-limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização. A NBR 8681, 2003, divide as ações incidentes sobre a estrutura em permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes são as que ocorrem com valores constantes ou com pequena variação durante praticamente toda a vida útil da estrutura. As ações variáveis ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida da estrutura. Já as ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e baixa probabilidade de ocorrência, mas que devem ser levadas em conta dependendo do projeto.

Ambas as normas especificam as combinações de carregamentos a serem utilizados em projetos de estruturas metálicas. Para quantificar as ações incidentes sobre a estrutura, montam-se combinações para estados limites últimos e de serviço. O presente



trabalho utilizou as combinações *i)* últimas normais, *ii)* últimas de construção e *iii)* últimas excepcionais assim como combinações *iv)* raras de serviço. A combinação última normal decorre do uso previsto para a estrutura para a verificação do estado-limite último, a de construção para levar em conta situações durante a montagem e as excepcionais para o caso de situações que levem a efeitos catastróficos. Já a combinação de serviço rara é utilizada para os estados-limites de serviço que causam danos permanentes à estrutura, como é o caso do deslocamento no topo da torre. Para as combinações últimas normais, emprega-se:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{G1,i}) + \gamma_{qi} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (6.4)$$

onde  $\gamma_{gi}$ ,  $\gamma_{qi}$ , são os coeficientes de ponderação das ações permanentes e variáveis;  $F_{G1,i}$ ,  $F_{Q1,k}$  e  $F_{Qj,k}$  são os valores característicos das ações permanentes, da ação variável principal e das demais ações variáveis; respectivamente, e  $\psi_{0j}$  representa o fator de combinação para ações variáveis. Para as combinações últimas de construção é recomendado:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{G1,i}) + \gamma_{qi} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (6.5)$$

onde  $F_{Q1,k}$  é o valor característico da ação variável admitida como principal para a situação transitória de construção. Para as combinações últimas excepcionais é indicado:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{G1,i}) + F_{Q1,exc} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (6.6)$$

onde  $F_{Q1,exc}$  é o valor da ação transitória excepcional.

Já para as combinações de serviço raras a especificação é:

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{G1,i} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} F_{Qj,k}) \quad (6.7)$$

onde  $\psi_{1j} F_{Qj,k}$  representa os valores frequentes das ações variáveis. Os coeficientes de ponderação dos esforços solicitantes são determinados segundo as considerações da NBR 8800, 2008.

### 6.3 Esforços combinados segundo a NBR 8800

No modelo proposto, o carregamento considerado gera na torre esforço normal (N), força cortante (V), momento fletor (M) e momento de torção (T). Assim, realizou-se a verificação conforme os critérios de resistência de barras submetidas a esses carregamentos em específico, de acordo com a NBR 8800, 2008. Para os carregamentos com atuação simultânea de esforço normal, força cortante e momento fletor, o critério é determinado de acordo com as seguintes equações de interação:

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{Rd}} \leq 1,0 \quad (6.8)$$

$$\frac{V_{sd}}{V_{Rd}} - 1 \leq 0 \quad (6.9)$$

onde  $N_{sd}$  é a força axial solicitante de cálculo de tração ou de compressão;  $N_{Rd}$  é a força axial resistente de cálculo de tração ou de compressão;  $M_{sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo, calculado como  $\sqrt{M_x^2 + M_y^2}$ ;  $M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo;  $V_{sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo e  $V_{Rd}$  é a força cortante resistente de cálculo.

Segundo a NBR 8800, 2008, se o momento de torção solicitante for pelo menos 20% do valor do momento de torção resistente, então os critérios 6.8 e 6.9 devem ser substituídos por:

$$\left( \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{Rd}} \right) + \left( \frac{V_{sd}}{V_{Rd}} + \frac{T_{sd}}{T_{Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (6.10)$$

onde  $T_{Sd}$  é o momento de torção solicitante de cálculo e  $T_{Rd}$  é o momento de torção resistente de cálculo.

### 6.3.1 Força axial resistente de cálculo

Para determinar a força axial resistente de cálculo ( $N_{Rd}$ ), que no caso de uma torre de um gerador eólico é de compressão, utiliza-se a seguinte expressão:

$$N_{Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6.11)$$

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;  $f_y$  a tensão de escoamento do material e  $\gamma_{a1}$  o coeficiente de ponderação. Para o cálculo do fator  $\chi$  é utilizado a estimativa da força axial de flambagem elástica  $N_e$  de vigas de seção circular vazada variável segundo Jaroszewicz e Zoryj, 1996.

Além disso, a norma prevê um critério específico para a flambagem local de barras de seção tubular circular, sendo dado pela seguinte relação:

$$\frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \quad (6.12)$$

onde  $D$  é o diâmetro do tubo;  $t$  a espessura do tubo;  $E$  o módulo de elasticidade do material e  $f_y$  a tensão de escoamento do material.

### 6.3.2 Momento fletor resistente de cálculo

Para determinar o momento fletor resistente de cálculo, utilizando seções tubulares circulares, considerando o estado limite de flambagem local da parede do tubo, com  $D/t$  não superior a  $0,45E/f_y$ , tem-se:

$$\text{Para } \lambda \leq \lambda_p, \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (6.13)$$

$$\text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( \frac{0,021E}{\lambda} + f_y \right) W \quad (6.14)$$

$$\text{Para } \lambda > \lambda_r, \quad M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left( \frac{0,33E}{\lambda} \right) W \quad (6.15)$$

sendo:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (6.16)$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y} \quad (6.17)$$

$$\lambda_r = \frac{0,31E}{f_y} \quad (6.18)$$

onde  $D$  é o diâmetro externo da seção transversal;  $t$  é a espessura da parede da seção transversal;  $M_{pl}$  é o momento de plastificação, calculado como  $t \times D^2 \times f_y$ ;  $\lambda_p$  é o índice de esbeltez limite para seções compactas;  $\lambda_r$  é o índice de esbeltez limite para seções semicompactas;  $E$  é o módulo de elasticidade e  $W$  é o módulo de resistência elástico.

### 6.3.3 Força cortante resistente de cálculo

Em seções tubulares circulares fletidas em relação a um eixo central de inércia, a força cortante resistente de cálculo,  $V_{Rd}$ , é dada por:

$$V_{Rd} = \frac{0,5 \tau_{cr} A_g}{\gamma_{a1}} \quad (6.19)$$

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

$$\tau_{cr} = \frac{1,6E}{\sqrt{\frac{L_v}{D} \left( \frac{D}{t_d} \right)^{\frac{5}{4}}}} \leq 0,6f_y \quad (6.20)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78E}{\left(\frac{D}{t_d}\right)^2} \leq 0,6f_y \quad (6.21)$$

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.

#### 6.3.4 Momento de torção resistente de cálculo

Para seções circulares de diâmetro D e espessura t, o momento de torção resistente de cálculo é igual ao maior dos seguintes valores:

$$T_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{1,23W_T E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{5/4} + \sqrt{\frac{L}{D}}} \leq \frac{0,6W_T f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6.22)$$

$$T_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,6W_T E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{3/2}} \leq \frac{0,6W_T f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6.23)$$

onde L é o comprimento da barra e  $W_T$  o módulo de resistência à torção.

### 6.4 Frequências Naturais

A análise das frequências naturais é importante no dimensionamento da torre, já que o aerogerador está sujeito a vibrações que podem levar à fadiga dos materiais. As normas que norteiam este trabalho não apresentam recomendações quanto às frequências naturais mínimas que a estrutura deve ter, portanto a restrição considerada baseada em trabalhos similares de projetos de aerogeradores foi que a frequência natural do primeiro modo de vibração deve ser maior ou igual a frequência de rotação do rotor, tomada como 26 rpm (valor usual em aerogeradores). Esta abordagem é coerente, pois é considerada para evitar que a torre entre em ressonância, o que pode levar a falha permanente por fadiga da estrutura.

### 6.5 Deslocamento no topo

Outra restrição que deve ser imposta ao problema é o deslocamento máximo admissível no topo da torre. A NBR 8800, 2008, não apresenta nenhuma recomendação quanto a deslocamentos máximos para torres. Deste modo, o deslocamento no topo da torre é tratado segundo as considerações da norma europeia Eurocode 3, 2006, mais especificamente a parte 3-2. Segundo o Eurocode 3, 2006, para uma verificação do estado limite de serviço, o deslocamento máximo permitido no topo da estrutura do aerogerador é de  $h/50$ , onde h é a altura da torre. No presente trabalho, a altura da torre é de 60 metros, portanto o deslocamento máximo admissível é de 1,2 metro.

## 7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### 7.1 Gerador eólico

O presente trabalho realizou a análise de um gerador eólico de eixo horizontal com três pás de 30 metros de comprimento e com uma torre de aço de 60 metros de altura. A torre tem o formato de tronco de cone vazado e é dividida em 4 segmentos de 15 metros. A divisão em segmentos é comum no mercado e visa facilitar o transporte da torre do local da fabricação até o local da instalação. O diâmetro da torre varia linearmente da base até o topo e cada segmento possui parede com espessura diferente.

Para a análise estrutural, o aerogerador foi discretizado em 60 elementos de pórtico espacial, sendo 20 elementos para a torre, 10 elementos para a nacela e 10 elementos para cada uma das pás. Essa discretização foi suficiente para assegurar a convergência dos resultados por elementos finitos. A Figura A1 apresenta o gerador eólico discretizado do presente trabalho. Aberturas e elementos internos da torre não foram considerados na simulação. As propriedades utilizadas foram as referentes a um aço comercial, sendo o peso

específico do material de  $7800 \text{ kg/m}^3$ , o módulo de elasticidade de  $210 \text{ GPa}$  e a tensão de escoamento de  $350 \text{ MPa}$ . Os pesos da nacele e do rotor foram considerados fixos, de modo que o objetivo do estudo visa somente à redução do peso da torre. A nacele foi simplificada como uma caixa retangular vazada de aço, com dimensões de  $1,5 \times 1,5 \times 10$  metros e espessura de  $8$  centímetros. A massa dos elementos internos da nacele foi considerada de  $5$  toneladas, distribuídas ao longo do comprimento da nacele. A massa e o momento de inércia das pás foram calculados de maneira simplificada, de acordo com os estudos feitos por Rodríguez *et al.*, 2007, Malcolm *et al.*, 2007 e Ashuri *et al.*, 2010.

## 7.2 Cálculo da Ação do vento na estrutura

Para quantificar a ação do vento sobre a torre e sobre as pás foram utilizados dois valores para a velocidade do vento. A primeira velocidade é utilizada para as verificações do estado-limite de serviço da torre, ou seja, o período de tempo em que o gerador eólico produz energia. Nesse caso, a velocidade limite do vento é de  $25 \text{ m/s}$ , e acima desse valor o rotor é travado por um sistema de freio. A segunda velocidade é utilizada para as verificações do estado-limite último da torre, ou seja, quando o gerador não está em funcionamento devido à velocidade elevada do vento. Para determinar a velocidade do vento para o estado-limite último, foi utilizado o procedimento dado pela NBR 6123, 1988, detalhado no item 6.1 do presente trabalho. A Tabela A1 apresenta os valores utilizados para determinar a velocidade característica do vento, onde  $V_0$  foi determinado segundo a isopleta que abrange o Rio Grande do Sul, o fator  $S_1$  foi determinado para um terreno plano ou fracamente acidentado,  $S_3$  foi considerado o referente a uma instalação com baixo fator de ocupação e  $S_2$  foi calculado para a altura de cada nó, e para exemplificar o comportamento desse fator, apenas o valor de alguns pontos foi tabelado.

A Tabela A2 apresenta os resultados para a velocidade característica do vento ( $V_k$ ) e para a pressão característica ( $q$ ). A mesma metodologia utilizada para o cálculo do fator  $S_2$  foi utilizada para calcular  $V_k$  e  $q$ , calculando esses valores para cada nó. Apenas os valores referentes a alguns nós são tabelados para mostrar o comportamento dessas variáveis.

Com o conhecimento da pressão característica que age sobre a estrutura, é possível calcular a força de arrasto causada pelo vento a partir da equação 6.3. O coeficiente de arrasto é calculado de acordo com as recomendações da NBR 6123, 1988, para perfis circulares, como apresentado na Tabela A4, onde o número de Reynolds é calculado para cada elemento, como  $70000 V_k D$ , considerando o diâmetro externo do elemento e uma velocidade característica do vento atuando no ponto médio do elemento.

Para calcular a força de arrasto ao longo da torre, simplificou-se o carregamento distribuído para cargas acumuladas, obtendo-se uma força escalonada ao longo do comprimento. Tomando como exemplo um elemento  $n$  qualquer, com nó inicial  $i$  e nó final  $j$ , então a força de arrasto nos nós  $i$  e  $j$  pode ser calculada de acordo com as Equações 7.1 e 7.2, respectivamente:

$$F_i = Ca \left( \frac{D_n \times L_n}{2} \right) \left( \frac{q(z_i) + q(z_m)}{2} \right) \quad (7.1)$$

$$F_j = Ca \left( \frac{D_n \times L_n}{2} \right) \left( \frac{q(z_m) + q(z_j)}{2} \right) \quad (7.2)$$

onde  $D_n$  é o diâmetro externo do elemento  $n$ ;  $L_n$  é o comprimento do elemento  $n$ ;  $q(z_i)$  é a pressão característica na altura do nó  $i$ ;  $q(z_m)$  é a pressão característica na altura média do elemento  $n$  e  $q(z_j)$  é a pressão característica na altura do nó  $j$ .

Para a ação do vento nas pás, é calculada a força de sustentação e a força de arrasto segundo princípios aerodinâmicos. O procedimento de cálculo foi baseado nos estudos de Jeong *et al.*, 2013. A Figura A4 ilustra os ângulos, velocidades e eixos utilizados para o cálculo. No sistema local da pá, identifica-se o ângulo de *pitch*  $\psi$  que a corda do aerogerador faz com o eixo local do elemento  $y_L$ . Depois identifica-se o ângulo  $\gamma$  que a velocidade relativa do vento  $V_{rel}$  faz com este mesmo eixo local  $y_L$ . Neste caso a velocidade relativa  $V_{rel}$  é a

composição vetorial da velocidade angular da pá (à distância da raiz em que se faz a avaliação), ou seja,  $V_{rel} = [(\omega r)^2 + V_0^2]^{1/2}$ . O ângulo de ataque de  $V_{rel}$  em relação ao perfil da pá é definido como  $\alpha = \psi + \gamma$ . Para o cálculo da força de arrasto ( $F_D$ ) e de sustentação ( $F_L$ ) procede-se como usual, ou seja,  $F_D = A_p q C_D(\alpha)$  e  $F_L = A_p q C_L(\alpha)$ . Os valores dos coeficientes são obtidos por interpolação de curvas experimentais para o aerofólio NACA23012 utilizado em aerogeradores. A Figura A5 apresenta a curva dos coeficientes aerodinâmicos de acordo com o ângulo de ataque.

Para obter as forças no sistema local do elemento de pá, calculam-se as componentes das forças aerodinâmicas neste sistema de coordenadas,  $F_{x_L} = 0$ ,  $F_{y_L} = -F_D \cos(\gamma) + F_L \sin(\gamma)$ ,  $F_{z_L} = F_D \sin(\gamma) + F_L \cos(\gamma)$ . Uma vez com as forças aerodinâmicas no sistema local do elemento de pá, procede-se a uma rotação para o sistema global de coordenadas.

### 7.3 Modelo de Otimização

Para a otimização através do algoritmo QPSO, a função objetivo a ser minimizada foi o peso da torre, dado por:

$$P = \sum_{n=1}^{20} \rho A_n L_n \quad (7.3)$$

onde  $n$  representa o número do elemento, sendo o elemento 1 na base e o elemento 20 no topo da torre;  $\rho$  o peso específico do material, tomado como  $7800 \text{ kg/m}^3$  para o aço;  $A_n$  a área da seção transversal do elemento  $n$  e  $L_n$  o comprimento do elemento  $n$ .

As restrições da otimização dizem respeito ao deslocamento no topo da torre, frequências naturais, esforço normal, flambagem local, força cortante, momento fletor, momento de torção e esforços combinados. A Tabela A3 apresenta as restrições do problema. Para garantir a segurança da estrutura, são consideradas as restrições de cada esforço individualmente, além das restrições dos esforços combinados. As restrições são dadas de forma adimensional, para que as ditas restrições possam ser avaliadas conjuntamente pela técnica da penalização.

As variáveis de projeto, que serão alteradas pelo algoritmo de otimização, são as espessuras de cada segmento da torre, o diâmetro na base e o diâmetro no topo da torre. Os diâmetros intermediários são linearizados, de modo que apenas os diâmetros na base e no topo são necessários para modelar completamente a geometria da torre. Desse modo o vetor das variáveis de projeto pode ser escrito como:

$$X = \{D_b, D_t, e_1, e_2, e_3, e_4\}^T \quad (7.4)$$

Os diâmetros da base e do topo foram considerados variáveis contínuas, tendo o seu espaço de procura variando de 1 a 6 metros. Já as espessuras foram consideradas como variáveis discretas, podendo assumir valores de acordo com dimensões comerciais. As dimensões consideradas foram as de chapas de aço laminadas a quente, da empresa ArcelorMittal, 2018. A Tabela A5 apresenta as espessuras correspondentes.

### 7.4 Ações incidentes sobre a estrutura e combinações

Avaliou-se a torre do gerador eólico considerando 10 ações incidentes sobre ela: peso, correspondente ao peso próprio da torre mais o peso dos elementos instalados no topo da torre; vento paralelo; vento perpendicular; vento a  $45^\circ$ ; vento extremo; ação de montagem; vento atuante durante a ação de montagem; vento paralelo em uma situação de funcionamento do aerogerador; desbalanceamento horizontal e desbalanceamento vertical.

Considerou-se o vento em diferentes ângulos de incidência para o caso do aerogerador parado. O vento paralelo corresponde a um ângulo de  $0^\circ$  com relação ao eixo do rotor, já o vento perpendicular corresponde a um ângulo de  $90^\circ$  com relação ao eixo do rotor. Para o vento extremo, foi considerada uma rajada de  $50 \text{ m/s}$ , sendo o dito vento extremo considerado uma ação excepcional. Para a ação de montagem, considerou-se a colocação das

pás no rotor realizada no topo da torre, de modo que em uma condição desfavorável, apenas 2 pás estão montadas de um lado do rotor, causando esforços devido à posição assimétrica das pás. Conjuntamente com a ação de montagem, somou-se a ação do vento atuando apenas para a situação em que 2 pás estão montadas de um lado do rotor.

Por fim, para a situação de funcionamento do aerogerador, considerou-se uma ação do vento com velocidade característica de 25 m/s, que é o limite máximo de funcionamento dos aerogeradores atuais. Para a situação de funcionamento, em que as pás do aerogerador estão em movimento, considerou-se também a possibilidade de desbalanceamento entre as pás, com uma massa desbalanceada de até 3% da massa de uma pá, de modo que o desbalanceamento cause uma força inercial. Esta força inercial foi considerada em duas ações separadas, como uma força horizontal e como uma força vertical. A força inercial é calculada como usual  $F_i = m * R * \omega^2$ , onde  $m$  é igual a 3% da massa de uma pá;  $R$  é o raio da pá e  $\omega$  a frequência de rotação do rotor. Foram utilizadas 7 combinações de carregamento, ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Combinações de carregamento e Estados Limite.

Ações	Combinação
Peso + Vento paralelo	Última normal
Peso + Vento perpendicular	Última normal
Peso + Vento a 45°	Última normal
Montagem + Vento	Última de construção
Peso + Vento Extremo	Última excepcional
Peso + Vento de operação + Desbalanceamento horizontal	Serviço rara
Peso + Vento de operação + Desbalanceamento vertical	Serviço rara

O estado-limite de serviço é utilizado na verificação do deslocamento no topo da torre e frequências naturais. Já os estados-limites últimos são utilizados na verificação dos esforços atuantes sobre a torre.

## 7.5 Resultados

A rotina de programação foi realizada para 10 rodadas independentes, com 300 iterações máximas para cada rodada. A Figura 7.1 apresenta o valor da função objetivo de acordo com uma rodada típica da otimização.

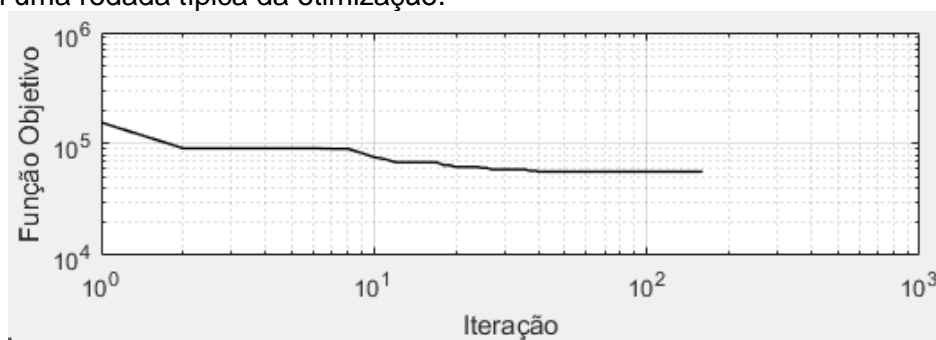


Figura 7.1 – Otimização da função objetivo

O peso mínimo encontrado ao longo das 10 rodadas, foi de 56,298 toneladas, valor bem abaixo do projeto inicial de 84,75 toneladas (sem violação de nenhuma restrição). Foram calculados também a média e o desvio padrão da função objetivo para as 10 rodadas independentes, sendo a média de 57,154 toneladas e o desvio padrão de 0,943 toneladas. Os valores das variáveis de projeto para a solução ótima foram: diâmetro na base de 3,84 m; diâmetro no topo de 2,07 m; espessura do segmento 1 de 16 mm; espessuras dos segmentos 2 e 3 de 12,5 mm e espessura do segmento 4 de 9,5 mm.

A Figura 7.2 apresenta as restrições de projeto para o melhor indivíduo. Quanto mais próxima de 0, mais ativa está a restrição. A restrição 1 representa o deslocamento no topo, 2 a frequência natural, 3 o esforço normal, 4 o momento fletor, 5 a força cortante, 6 o momento de torção, 7 o esforço combinado de normal e fletor, 8 todos os esforços combinados e por fim 9 a flambagem local.



Figura 7.2 – Restrições de projeto do melhor indivíduo

Nota-se que a restrição que delimitou o problema de otimização foi a frequência natural, enquanto as outras restrições não ficaram ativas. A Figura A2 apresenta os modos de vibração da torre otimizada. A frequência natural do primeiro modo de vibração foi de 0,433 Hz, ou 26 rpm, que é exatamente a frequência de rotação do rotor. O que de fato comprova que a restrição da frequência natural ficou ativa.

## 8. CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu uma rotina de programação através do software MATLAB para otimizar o projeto estrutural de uma torre de gerador eólico. A rotina de otimização teve como função objetivo o peso da torre sujeita ao peso dos elementos superiores a torre, peso próprio e carregamento do vento, abordado com diferentes velocidades e ângulos de incidência (combinações). A nacela e as pás foram modeladas de forma simplificada e não foram consideradas as aberturas e elementos internos da torre. As variáveis de projeto foram o diâmetro da base, diâmetro do topo, e espessura de cada um dos segmentos da torre. As restrições do projeto consistiram no deslocamento no topo da torre, frequência natural da torre e esforços incidentes sobre a torre.

Aplicou-se o algoritmo QPSO em conjunto com uma análise estrutural, de modo que a cada iteração foram verificadas as restrições do projeto e atualizadas as variáveis de projeto, na busca pelo menor peso possível. Por fim, chegou-se a uma torre com peso de 56,298 toneladas. Concluiu-se que a restrição da frequência natural foi a única restrição ativa, ou seja, foi a restrição que determinou o peso mínimo da torre. O algoritmo proposto mostrou-se adequado e robusto em vista da baixa variabilidade para a função objetivo mínima encontrada, após múltiplas inicializações independentes.

O processo de otimização obteve bons resultados frente ao que foi proposto, ou seja, com um tempo computacional razoavelmente baixo, a rotina de programação realizou a análise estrutural de um gerador eólico simplificado e alcançou um valor mínimo do peso da torre do gerador, sem violar as restrições do projeto.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de um gerador eólico mais realista, levando em conta aberturas e elementos internos da torre, bem como um estudo sobre a fadiga. Também recomenda-se o estudo a partir de normas estrangeiras, visto que a NBR 8800 não é uma norma específica para torres metálicas. Por fim, sugere-se a utilização de outros algoritmos metaheurísticos para avaliar seu desempenho frente ao algoritmo utilizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123. “**Forças devidas ao vento em edificações**”. 1988.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8681. “**Ações e segurança nas estruturas**”. 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800. “**Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**”. 2008.

ArcelorMittal. “**Catálogo de produtos**”. <http://longos.arcelormittal.com/produtos/catalogos/catalogo-tecnico>. Acessado em 02/05/2018.

Arora, J. S. “**Introduction to Optimum Design**”. McGraw-Hill, New York, 1989.

Ashuri, T., Zaaier, M., Bussei, G., van Kulk, G. “**An Analytical Model to Extract Wind Turbine Blade Structural Properties for Optimization and Up-scaling Studies**”, 3rd EWEA Conference The Science of making Torque from Wind, Heraklion, Crete, Greece, 1-7, 2010.

Atlas Eólico. “**Rio Grande do Sul**”. Elaborado por Camargo Schubert Engenheiros Associados, Eletrosul Centrais Elétricas S.A.. Dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS TruePower. Porto Alegre, SDPI: AGDI, 2014, 116p. ISBN 978-85-67342-01-6.

Dumby, H. J. M. “**Aspetos de dimensionamento de torres eólicas tubulares em aço**”, Dissertação de mestrado, FCTUC, Portugal, 2014.

Eurocode 3: Design of Steel Structures, Parte 3-2: “**Towers, masts and chimneys**”, 2006.

Feijó, B. P. “**Otimização de torres de aço para geradores eólicos**”, Dissertação de mestrado, UFC, CE, 2010.

Ferreira, A. J. M., “**Matlab codes for Finite element analysis of structures**”, Springer, 235p. 2009.

Gundtoft, S. “**Wind Turbines**”. 2<sup>nd</sup>. Edition, University College of Aarhus, June 2009.

Jaroszewicz, J.; Zoryj, L. “**Critical Euler load for a cantilever tapered beam**”, Mechanika Teoretyczna I Stosowana, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, V.4, No.34, 1996.

Jeong, M.-S.; Lee, I.; Yoo, S.-J.; Park, K.-C. “**Torsional Stiffness Effects on the Dynamic Stability of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade**”, MDPI, Basel, Suíça, 2013.

Kennedy, J.; Eberhart, R. C. “**Particle Swarm Optimization**”. In: Proceedings of the IEEE Int. Conference on Neural Networks, 1995.

Malcolm, D. J., Laird, D. L. “**Extraction of Equivalent Beam Properties from Blade Models**”. Wind Energ. 2007; 10:135–157.

MATLAB, “**MATrix LABoratory, R2012a**”. The MathWorks Inc., Natick, MA, 2000. <[www.mathworks.com/](http://www.mathworks.com/)>. Acessado em 01/09/2016.

Rao, S. S., “**Engineering Optimization: Theory and Practice**”, 4th Edition, Wiley, 2009.

Rodríguez, A. G. G., Rodríguez, A. G., Payán, M. B. “**Estimating Wind Turbines Mechanical Constants**”, RE&PQJ, Vol. 1, No.5, March, 2007.

Santos, N. A. A. S. “**Otimização de torre de aço para aerogerador eólico**”, Dissertação de mestrado, UERJ, RJ, 2013.

Sun, J.; Lai, C.-H.; Wu, X.-J. “**Particle Swarm Optimisation - Classical and Quantum Perspectives**”, CRC Press, EUA, 2012.

Vries, E. “**How to service and maintain a wind turbine blade**”. <<https://www.windpowermonthly.com/article/1137943/service-maintain-wind-turbine-blade>>, 2012. Acessado em 01/05/2018.

Yang, X.-S. “**Engineering Optimization – An Introduction with Metaheuristic Applications**”, Wiley, EUA, 2010.

Yoshida, S. “**Wind turbine tower optimization method using genetic algorithm**”, Wind Engineering – Vol 30, Japão, 2006.



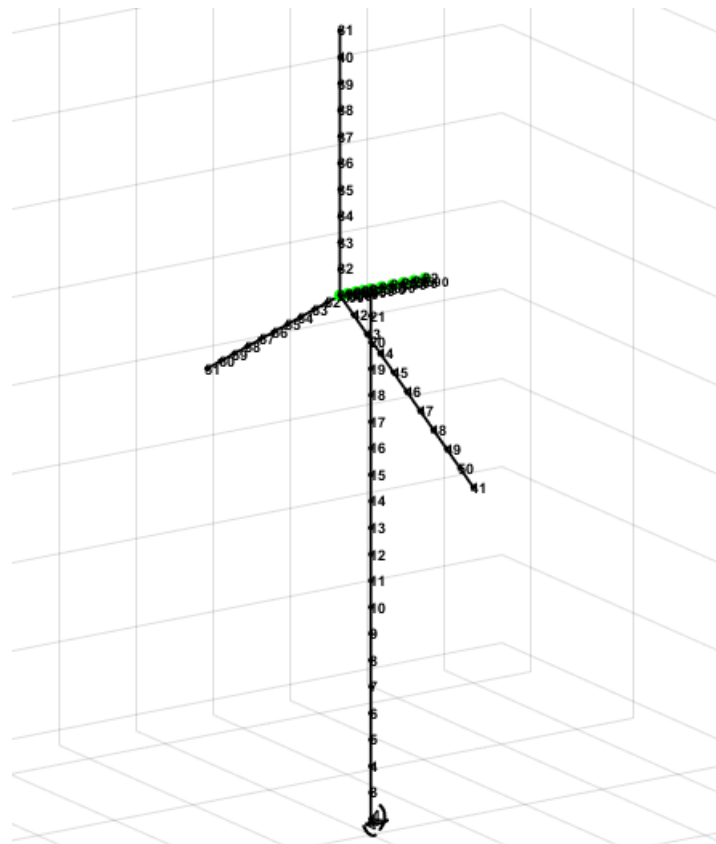


Figura A1 – Gerador eólico discretizado.

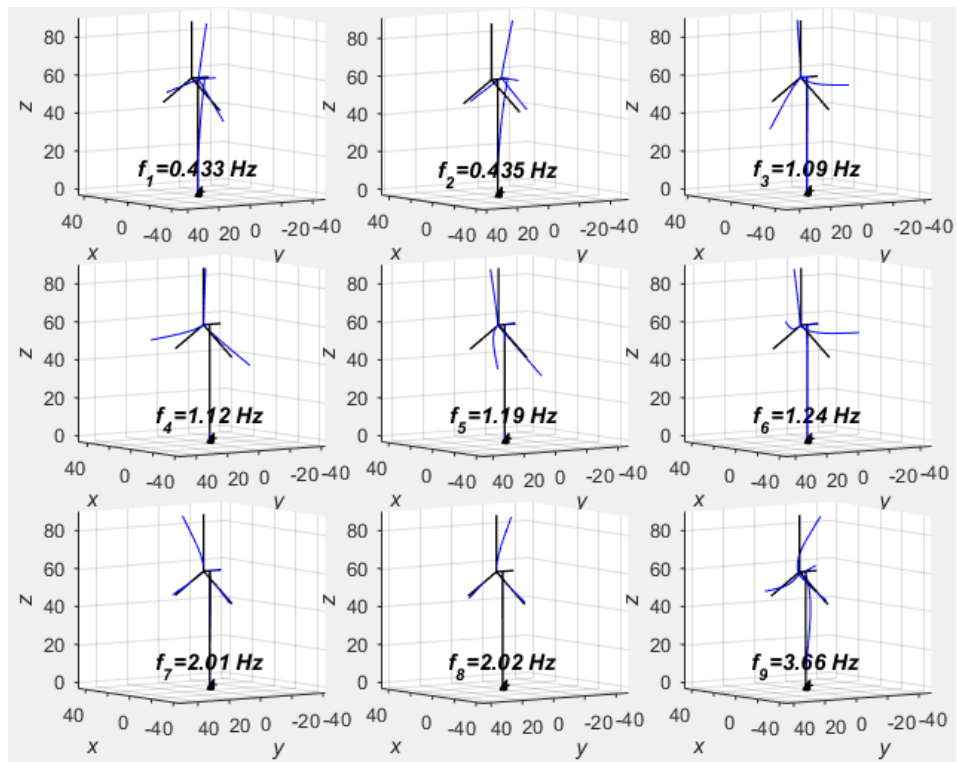


Figura A2 – Modos de vibração da torre.

Tabela A1 - Valores do carregamento do vento.

$V_0$	45 m/s	
$S_1$	1	
$S_2(z)$	5	0,8864
	10	0,95
	20	1,0182
	30	1,0603
	40	1,0913
	50	1,1159
	60	1,1364
$S_3$	0,95	

Tabela A2 - Resultados do carregamento do vento.

Altura (m)	Velocidade característica $V_k$ (m/s)	Pressão característica $q$ (N/m <sup>2</sup> )
5	37,8928	880,2
10	40,6125	1011,1
20	43,5274	1161,4
30	45,3286	1259,5
40	46,6515	1334,1
50	47,7042	1395
60	48,5819	1446,8

Tabela A3 – Restrições da otimização.

1	Deslocamento no topo	$d/d_{m\acute{a}x} - 1 \leq 0$
2	Frequência Natural	$f_{m\acute{i}n}/f - 1 \leq 0$
3	Esforço Normal	$N_{Sd}/N_{Rd} - 1 \leq 0$
4	Momento Fletor	$M_{Sd}/M_{Rd} - 1 \leq 0$
5	Força Cortante	$V_{Sd}/V_{Rd} - 1 \leq 0$
6	Momento de Torção	$T_{Sd}/T_{Rd} - 1 \leq 0$
7	Esforços combinados	$N_{Sd}/N_{Rd} + M_{Sd}/M_{Rd} \leq 1,0$
8	Esforços combinados	$(N_{Sd}/N_{Rd} + M_{Sd}/M_{Rd}) + (V_{Sd}/V_{Rd} + T_{Sd}/T_{Rd})^2 \leq 1$
9	Flambagem Local	$(D/t)/(0,45E/f_Y) - 1 \leq 0$

onde  $d$  é o deslocamento no topo da torre;  $d_{m\acute{a}x}$  é o deslocamento máximo permitido, de acordo com o item 6.4;  $f$  é a primeira frequência natural da torre;  $f_{m\acute{i}n}$  é a frequência mínima permitida, de acordo com o item 6.3.

ANEXOS

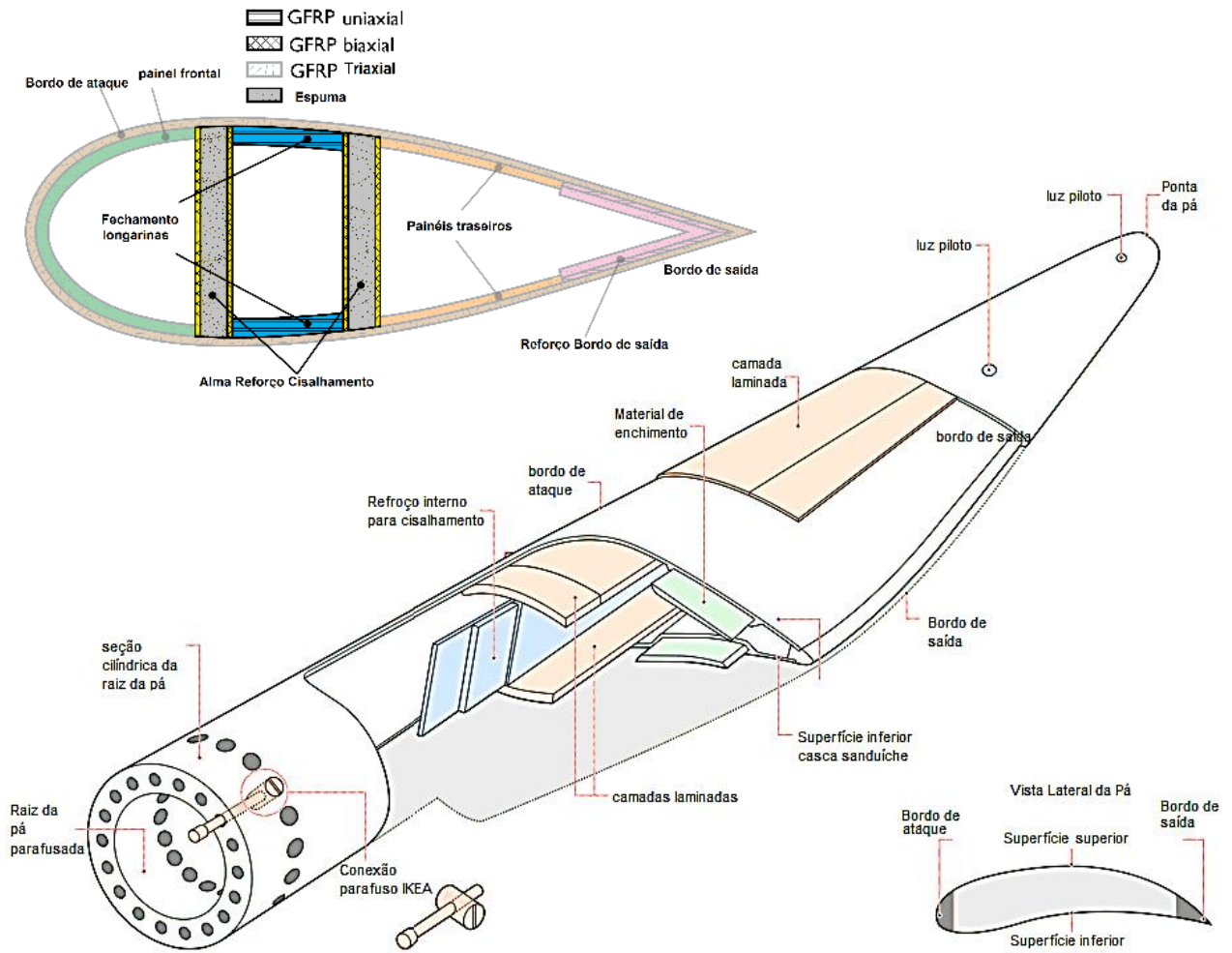


Figura A3- Vista interna e corte de uma pá típica de aerogerador e materiais empregados. (Vries, 2012).

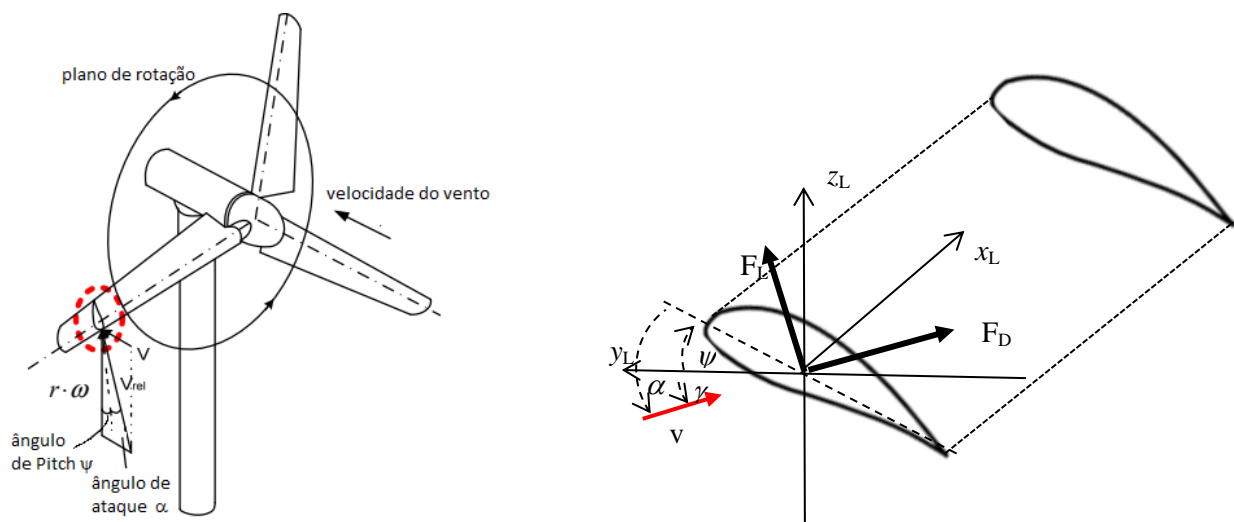


Figura A4 – (a) Composição da velocidade relativa na pá do aerogerador. (b) Esforços aerodinâmicos no sistema de coordenadas local do elemento de pá do aerogerador. (Jeong *et al.*,2013)

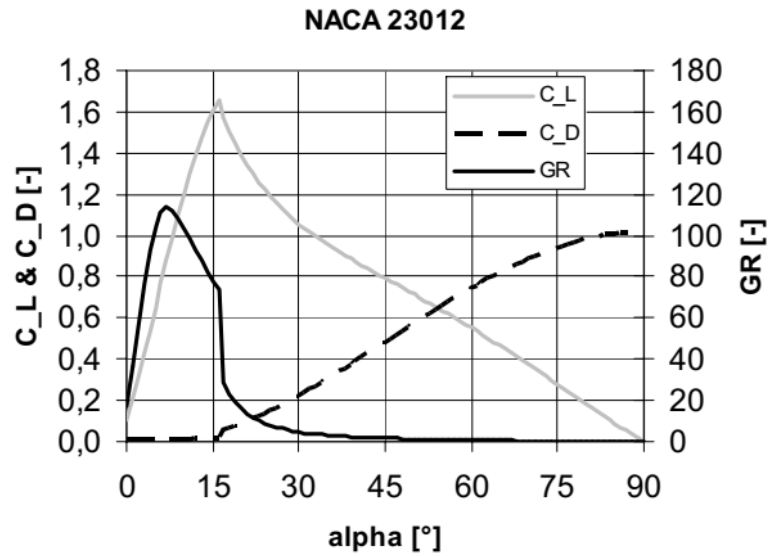


Figura A5 – Coeficientes aerodinâmicos de acordo com o ângulo de ataque. (Gundtoft, 2009)

Tabela A4 - Valores do coeficiente de arrasto.

Número de Reynolds	Coeficiente de arrasto
$Re < 4,2 \times 10^5$	1,2
$4,2 \times 10^5 \leq Re < 8,4 \times 10^5$	0,6
$8,4 \times 10^5 \leq Re < 2,3 \times 10^6$	0,7
$2,3 \times 10^6 \leq Re$	0,8

Tabela A5 - Espessuras comerciais de chapas de aço.

Índice	Espessura (mm)
1	4,75
2	6,30
3	8,00
4	9,50
5	12,50
6	16,00
7	19,00
8	22,40
9	25,40
10	31,50
11	37,50
12	44,50
13	50,00
14	63,00
15	75,00
16	100,00