

**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE BRAGANÇA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO**

**QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO PARA UMA TORRE EÓLICA  
DE PEQUENAS DIMENSÕES DE ACORDO COM A METODOLOGIA  
DOS EUROCÓDIGOS ESTRUTURAIS.**

**FERNANDO GUERRA FERRARI**

Relatório Final de Dissertação apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

**Fevereiro 2019**

**FERNANDO GUERRA FERRARI**

**QUANTIFICAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO PARA UMA TORRE EÓLICA  
DE PEQUENAS DIMENSÕES DE ACORDO COM A METODOLOGIA  
DOS EUROCÓDIGOS ESTRUTURAIS.**

**Tese de mestrado apresentada como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Mestre em Engenharia da Construção  
da Escola Superior de Tecnologia e  
Gestão – ESTIG – do Instituto  
Politécnico de Bragança – IPB.**

**Orientador: Prof. Dr. Manuel Teixeira  
Braz César**

**Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr. Marina Rocha  
Pinto Portela Nunes**

Fevereiro 2019

---

---

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família por todo o suporte incontestável que me deram ao longo de toda minha vida. Um agradecimento especial a minha mãe, minha melhor amiga e melhor conselheira, sem ela não estaria onde estou hoje, o meu mais sincero obrigado e amor eterno.

Agradeço ao professor orientador deste estudo, Dr. Manuel Teixeira Braz César por toda ajuda, consideração, apoio e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a professora Dr. Marina R. Nunes pelas sugestões e correções apresentadas, aos professores do Instituto Politécnico de Bragança e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Pato Branco que acompanharam minha jornada acadêmica.

Agradeço também aos meus amigos, presencial e virtualmente, e companheiros de trabalhos que me deram suporte emocional e me propiciaram excelentes momentos de tréguas aos estudos. Estes momentos ficarão guardados para sempre em minha memória.

Por fim, a todos aqueles, de uma maneira direta ou indireta possibilitaram a realização deste trabalho bem como a incrível experiência que foi e está sendo este intercâmbio. Muito obrigado.

## RESUMO

A nova ordem energética mundial está tendendo para o lado da sustentabilidade, para o melhor custo benefício na relação meio ambiente e sociedade e, para tanto, fontes de energias como a eólica estão cada vez mais ao olhar dos investimentos e pesquisas para melhor compreensão e competitividade de mercado. Aliado a isso, uma maior tendência à construção de estruturas esbeltas e suscetíveis às ações externas do meio ambiente, principalmente às ações do vento e sismos, faz com que uma melhor compreensão dos efeitos dinâmicos sobre tais estruturas seja necessária. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo a quantificação da ação do vento sobre uma torre metálica de aerogerador de pequeno porte. Para tanto, foi realizado uma modelação 3D da torre com o auxílio do software SolidWorks, assim como um modelo numérico através do software ANSYS para a obtenção das frequências de vibração da estrutura, bem como seus deslocamentos modais. Em tal modelo foi feita simplificações para que se pudesse utilizar as normativas de cálculo, como a não consideração da interferência do funcionamento do aerogerador e sua influência na relação fluido-aerogerador-fluido-torre, além da não consideração da escada na modelação. Em seguida, foram apresentados os procedimentos de cálculo normatizados pelo Eurocódigo EN 1991.1.4 de 2010, com obtenção das ações devido ao vento na direção do escoamento. Então, foi realizada uma análise em relação ao fenômeno de desprendimento de vórtices, na direção transversal ao escoamento e, por se tratar de uma torre com rigidez muito elevada, os fenômenos de fadiga não foram analisados.

**Palavras-chave:** Torre eólica. Análise dinâmica. Quantificação força vento. Desprendimento de vórtices. Frequências de vibração.

## ABSTRACT

The new world energy order is tending towards the sustainability side, for the best cost benefit in the relation environment and society and, for that, energies sources as the wind power are more and more to the look of investments and researches for better understanding and market competitiveness. Allied to this, a greater tendency to the construction of slender structures and susceptible to the external environment actions, mainly to the wind actions and earthquakes, it makes necessary a better understanding of the dynamic effects on such structures. In this context, the present study aimed to quantify the wind action on a small wind turbine metal tower. For this, a 3D modeling of the tower was made with the SolidWorks software, as well as a numerical model through ANSYS software to obtain the vibration frequencies of the structure and its modal displacements. This model was simplified so that calculation rules could be used, such as not considering the interference of the operation of the wind turbine and its influence on the fluid-aerogenerator-fluid-tower relation, besides not considering the ladder in the modeling. Next, the calculation procedures were presented, normalized by Eurocode EN 1991.1.4 of 2010, obtaining the actions due to the wind in the direction of the flow. Then, an analysis was made regarding the phenomenon of vortex shedding, in the direction transverse to the flow. Because it is a tower with very high stiffness, the fatigue phenomena were not analyzed.

**Keywords:** Wind tower. Dynamic analysis. Wind force quantification. Vortex shedding. Vibration frequencies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Velocidade do vento ao longo do tempo .....	13
Figura 2 - Perfil de velocidade do vento .....	14
Figura 3 - Comparativo energia eólica entre países.....	17
Figura 4 - Potencial eólico brasileiro. ....	18
Figura 5 - Componentes de um aerogerador. ....	21
Figura 6 - Diferentes tipos de aerogeradores.....	22
Figura 7 - Tamanho das pás ao longo dos anos .....	23
Figura 8 - Escavação e alocação das armaduras. ....	24
Figura 9 - Cérceas e chumbadores .....	25
Figura 10: Concretagem e porcas de nivelamento.....	25
Figura 11 - Dados geométricos torre.....	26
Figura 12 - Detalhe geométrico flange .....	27
Figura 13 - Dados geométricos dos cutelos de tipo 1 e 2. ....	27
Figura 14 - Disposição dos cutelos .....	28
Figura 15 - Detalhes da seção transversal utilizado no modelo numérico. ....	30
Figura 16 - Deformação torre.....	31
Figura 17 - Função modal. ....	32
Figura 18 - Velocidades médias anuais do continente Europeu.....	38
Figura 19 - Coeficiente de exposição $c_e(z)$ para $c_0 = 1,0$ e $k_1 = 1,0$ . ....	40
Figura 20 - Coeficiente de força, considerando uma base circular, com extremidades sem livre escoamento e diferentes valores de rugosidades equivalentes.....	41
Figura 21 - Propriedades geométricas de chaminés.....	42
Figura 22 - Coeficiente de extremidade. ....	43
Figura 23 - Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo.....	45
Figura 24 - Função da densidade espectral de potência ( $S_L(f_L)$ ).....	50
Figura 25 - Desprendimento de vórtice em um objeto simétrico. ....	53
Figura 26 - Números de Strouhal para diferentes seções transversais.....	54
Figura 27 - Número de antinós em função do comprimento de correlação $L_j$ .....	57
Figura 28 - Valor básico do coeficiente de força lateral ( $C_{lat,0}$ ).....	58
Figura 29 - Gráfico massa em função da altura .....	63
Figura 30 - Disposição força torre .....	67
Figura 31 - Disposição das forças desprendimento de vórtices .....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distribuição matriz energética Portugal Continental.....	19
Quadro 2 - Dados técnicos adicionais do aerogerador. ....	29
Quadro 3 - Frequências de vibração .....	30
Quadro 4 - Deslocamento modal.....	32
Quadro 5 - Valor básico da velocidade de referência do vento.....	34
Quadro 6 - Categorias de terreno.....	35
Quadro 7 - Categorias e parâmetros de terrenos.....	37
Quadro 8 - Rugosidade superficial equivalente.....	42
Quadro 9 - Esbelteza efetiva da estrutura ( $\lambda$ ).....	44
Quadro 10 - Valores aproximados para o decréscimo logarítmico estrutural do amortecimento no modo fundamental. ....	48
Quadro 11 - Comprimento de correlação efetivo em função da amplitude de vibração.....	57
Quadro 12 - Coeficiente de força lateral ( $C_{lat}$ ).....	58
Quadro 13 - Cálculo do valor de referência da velocidade do vento ( $v_b$ ).....	60
Quadro 14 - Cálculo da velocidade média do vento ( $v_m$ ).....	60
Quadro 15 - Cálculo do coeficiente de exposição ( $c_e$ ).....	61
Quadro 16 - Cálculo do coeficiente de força ( $C_f$ ). ....	61
Quadro 17 - Cálculo das massas equivalentes por elemento. ....	62
Quadro 18 - Cálculo coeficiente resposta quase-estática ( $B^2$ ) .....	63
Quadro 19 - Cálculo do coeficiente estrutural ( $C_s C_d$ ).....	64
Quadro 20 - Forças causadas pelo vento. ....	66
Quadro 21 - Fator de resposta de rajada. ....	68
Quadro 22 - Fenômeno de desprendimento de vórtices. ....	69
Quadro 23 - Ações devido ao fenômeno de desprendimento de vórtice.....	70

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.3 JUSTIFICATIVA.....	11
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO.....</b>	<b>13</b>
2.1 CONCEITOS SOBRE VENTOS.....	13
2.2 ENERGIA EÓLICA: VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	15
2.3 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA.....	16
2.3.1 Energia eólica no Brasil.....	18
2.3.2 Energia eólica em Portugal.....	19
2.4 COMPONENTES DE UMA TORRE EÓLICA.....	20
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
3.1 DADOS FUNDAÇÃO E PROCESSOS CONSTRUTIVOS.....	24
3.2 DADOS GEOMÉTRICOS E ESTRUTURAIS.....	26
3.3 DADOS DO AEROGERADOR.....	28
3.4 MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	29
3.5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	32
3.5.1 Modelação das ações do vento.....	33
3.5.2 Vibrações na direção do escoamento.....	36
3.5.3 Fator de resposta de rajada.....	37
3.5.4 Coeficiente de exposição.....	39
3.5.5 Coeficiente de força.....	41
3.5.6 Coeficiente estrutural.....	44
3.5.7 Forças causadas pelo vento.....	51
3.5.8 Fenômeno de desprendimento de vórtices.....	52
<b>4 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
4.1 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	60
4.1.1 Modelação das ações do vento.....	60
4.1.2 Vibrações na direção do escoamento.....	60
4.1.3 Coeficiente de exposição.....	61
4.1.4 Coeficiente de força.....	61

4.1.5	Coeficiente estrutural.....	62
4.1.6	Forças causadas pelo vento.....	65
4.1.7	Fator de resposta de rajada.....	68
4.1.8	Fenômeno de desprendimento de vórtices.....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>733</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDOS FUTUROS.....</b>	<b>734</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>735</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Há cada vez mais um crescimento no que tange a necessidade em encontrar alternativas para a substituição das fontes finitas de combustíveis fósseis, as quais majoritariamente suprem a demanda dos sistemas industriais e da produção de energia, atualmente.

O contínuo crescimento da demanda energética das últimas décadas, aliado com o aumento exponencial do consumo por economias emergentes fez com que governos e instituições intervissem para estimular o avanço tecnológico na área de energias renováveis devido, principalmente, ao seu apelo para o meio ambiente e uma tentativa de atenuar as mudanças climáticas (IEA, Key World Energy Statistics, 2013).

A geração de eletricidade através do vento é uma ideia tão antiga quanto a eletricidade em si, mas o desenvolvimento tecnológico acerca do assunto somente se tornou viável em soluções de larga escala nas recentes décadas. O vento tem um grande potencial, uma vez que existe em uma vasta extensão territorial com considerável aproveitamento em muitas regiões, o que justifica o grande investimento e rápida expansão que este sistema vem apresentando nas últimas décadas (MANWELL, 2009).

Dessa maneira, desenvolver tecnologias e ter uma maior compreensão do comportamento das mesmas se torna necessário para viabilizar economicamente o uso de energias renováveis e torna-se fundamental quando se discute o futuro energético mundial e o bem-estar social. Uma vez que além de causarem impactos ambientais minimizados, essas fontes são inesgotáveis e, ao contrário do petróleo, estão mais bem distribuídas geograficamente, democratizando o processo de produção de energia (MARQUES, 2007).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo geral a quantificação da ação do vento para uma torre eólica de pequenas dimensões de acordo com a metodologia dos Eurocódigos Estruturais.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a finalidade de alcançar o objetivo geral proposto pelo presente estudo, foram estabelecidos objetivos específicos, sendo eles:

- Levantamento geométrico da estrutura;
- Modelação 3D da torre em estudo com os *softwares* AutoCad e SolidWorks;
- Modelação numérica simplificada da estrutura com o *software* ANSYS;
- Modelo de cálculo segundo a EN 1991.1.4.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas tem-se intensificado a busca por fontes alternativas de produção de energia, com o intuito de reduzir a dependência da matriz energética de fontes não renováveis. Motivados principalmente pelo apelo ao meio ambiente que as energias renováveis proporcionam, fontes como a luz solar, biomassa e, principalmente vento vêm se tornando objeto de estudo e investimento.

Desta forma, a relevância do estudo técnico de turbinas eólicas se justifica tendo em vista que a energia proveniente da força dos ventos é a alternativa que mais experimentou crescimento da capacidade instalada e de produção energética no Brasil e, principalmente em Portugal. Portanto, desenvolver, projetar e construir aerogeradores cada vez mais eficientes são fundamentais, a fim de otimizar a extração dos recursos naturais e de viabilizá-los economicamente (STANO JÚNIOR & TIAGO FILHO, 2007).

Além disso, a importância da compreensão acerca de eventos dinâmicos nas estruturas se faz necessário pois, juntamente com os fenômenos sísmicos, as ações

do vento são em regra as condições ambientais dominantes no que diz respeito ao dimensionamento de estruturas. E com a tendência de as estruturas atuais ficarem cada vez mais esbeltas, a interferência de excitações externas (sismos e, principalmente ventos) muitas vezes se tornam fatores condicionantes no que tange o dimensionamento de estruturas (HOLMES, 2015).

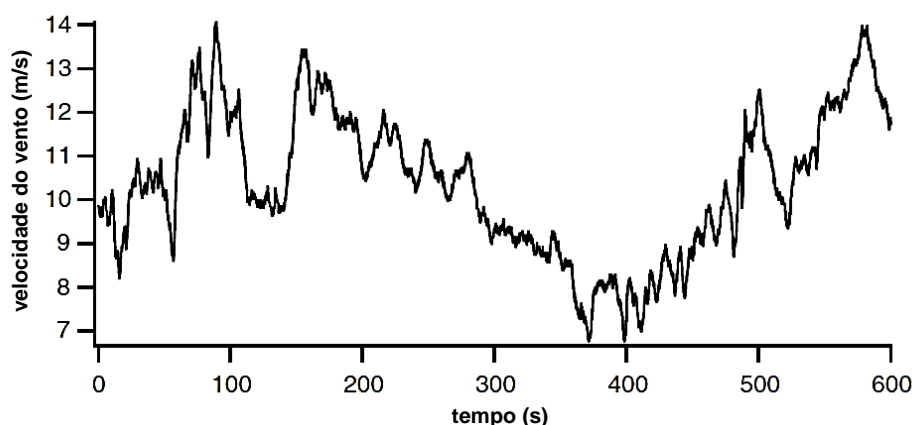
## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

### 2.1 CONCEITOS SOBRE OS VENTOS

A fonte para a movimentação atmosférica é o desigual aquecimento da superfície da terra, causada pela radiação solar. Diferentes pressões atmosféricas ao longo do globo fazem com que grandes massas de ar sejam deslocadas, causando o fenômeno dos ventos.

A variação do vento pode ser modelada estatisticamente como um processo estocástico, tanto para dados de longo ou curto prazo. Um processo estocástico é aquele onde há o envolvimento de diversas variáveis e tendo, por vezes, infinitas direções nas quais o processo pode evoluir. Ao contrário de sistemas determinísticos onde o comportamento final do evento pode ser previsto (GROGG, 2005).

As variações do vento podem ser observadas em intervalos anuais, diurnos ou de curto prazo. Variações de curto prazo normalmente correspondem a intervalos de 10 minutos ou menos, incluindo rajadas e turbulências que causam significativas flutuações sobre o valor médio da velocidade do vento, como pode ser visto na imagem abaixo (MANWELL, 2009).

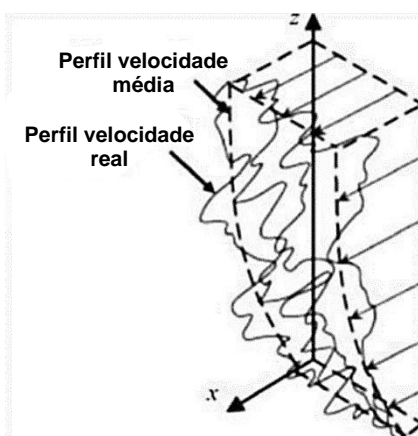


**Figura 1 - Velocidade do vento ao longo do tempo**  
Fonte: Adaptado de MANWELL, 2009.

A média anual da velocidade do vento é obtida através do monitoramento da velocidade em um sítio por, ao menos, um período de um ano. Tal parâmetro é crucial para o planejamento e/ou otimização de um parque eólico, uma vez que a velocidade

do vento é o parâmetro mais influente na performance de uma torre eólica e na produção elétrica (MANWELL, 2009).

O vento normalmente é estudado tendo uma distribuição vertical descrita por um perfil de evolução logarítmica, levando em consideração as suas velocidades médias. A camada limite atmosférica gera um gradiente de vento, indicando a variação vertical na velocidade do vento em relação à altura acima do solo, causada pela interação direta da atmosfera com a superfície da Terra, como pode ser visto na figura abaixo (ROHATGI, 1994).



**Figura 2 - Perfil de velocidade do vento**  
Fonte: adaptado de TEMPEL, 2009.

A velocidade do vento é mais baixa próxima ao solo devido a presença de obstáculos como construções, árvores, a própria orografia e rugosidade do terreno. Contudo, há uma diferença no perfil de velocidade média (normalmente uma função logarítmica) e o real perfil de velocidade do vento. Este último possui flutuações tanto verticalmente quanto horizontalmente devido ao fenômeno de turbulência, causado pela interação entre o fluido e os obstáculos presentes (TAYLOR, 2011).

À medida que se analisa a vento em altitudes mais baixas, entre 100/150 metros, a interação entre o solo e as massas de ar em circulação começa a surgir forças de corte atríticas com direção contrária ao movimento da massa de ar que, desacelera e a muda a direção do seu movimento. São estes os ventos com interesse para a produção de energia eólica e para os quais as normas de construção estão adaptadas (DYRBYE, 1997).

Já em relação à produção de energia, a medida da velocidade dos ventos e suas variações anuais, sazonais, diárias e de curta duração são fundamentais na análise de viabilidade de um empreendimento energético, pois cada região possui um

microclima e condições específicas. Nesse sentido, do ponto de vista do máximo aproveitamento energético, o estudo da direção predominante, velocidade e constância do vento é um importante critério para se definir a localização de um parque eólico bem como o posicionamento de suas torres (ROSA & TIAGO FILHO, 2007).

## 2.2 ENERGIA EÓLICA: VANTAGENS E DESVANTAGENS

A energia eólica é uma modalidade que está cada vez mais presente nas matrizes energéticas dos países, principalmente os considerados de primeiro mundo. É caracterizada como sendo de fonte renovável e de menor impacto ambiental quando comparada a outras fontes energéticas, tais como petróleo e derivados, carvão mineral, gás natural, hidráulica entre outras (VICHI, 2009).

Um dos principais argumentos a favor da energia eólica é em relação a baixa emissão de gases poluentes. A título de exemplo, um aerogerador de 600kW de potência instalada em uma área com boa incidência de ventos, pode impedir a emissão de 20.000 a 36.000 toneladas de CO<sub>2</sub> no meio-ambiente (MARTINS et al, 2008).

Entretanto, diversos estudos da literatura têm demonstrado que os empreendimentos eólicos podem causar, em toda sua cadeia produtiva, impactos negativos ao meio ambiente, podendo afetar a fauna, flora, solo e o ar, bem como a saúde e bem estar em populações humanas (WANG, 2015).

Na fase de construção e descomissionamento da usina, observa-se níveis mais elevados de ruídos, na ordem de 80 dB, num raio de 30 m do local, devido às atividades das obras, tais como movimentações de terras e de infraestrutura. Entretanto, essas atividades mais ruidosas são operadas em período mais reduzido, prevalecendo ao longo da produção de energia ruídos mais brandos (BARRADAS et al, 2014).

Já em relação à fauna, o principal impacto negativo da energia eólica é a interferência dos aerogeradores sobre as aves. Os pássaros podem colidir com os aerogeradores, devido sua dificuldade de visualização. Portanto, a instalação de parques eólicos em regiões densamente povoada por pássaros deve ser analisada

com cautela, principalmente no caso de detecção de rotas migratórias. Entretanto, as baixas rotações do rotor e as baixas alturas de instalação das torres fazem com que, mesmo em lugares onde há parques eólicos instalados, a representatividade dessas colisões na causa de morte de aves seja muito inferior a caça, linhas de transmissão e tráfego, por exemplo (CUSTÓDIO, 2007).

No que diz respeito ao espaço de implantação, a área que um parque eólico solicita é muito grande, da ordem de 10 MW/km<sup>2</sup>. Entretanto, o espaço efetivamente utilizado, referente à base do aerogerador, é da ordem de 1%. Por isso, ele pode ser conjuntamente aproveitado para outra finalidade, como pecuária e agricultura. Além disso, o solo permanece nas condições originais e outro ponto a ser observado é que, de modo em geral, não há alteração do lençol freático por consumo, contaminação, geração de resíduos ou lançamento (CORREA, 2010).

Uma relação interessante de ser mencionada é o fator de produção do equipamento gerador de energia, que é a relação entre a energia gasta para fabricá-lo e o potencial energético que ele oferece ao longo de sua vida útil. O fator de produção de torres eólicas varia de 10 a 30, enquanto o de painéis fotovoltaicos está entre 3 e 5, os de tecnologia termossolar entre 20 e 50 e os mais eficientes são as pequenas centrais hidroelétricas, cujo fator de produção varia de 80 a 100 (ROSA & TIAGO FILHO, 2007).

Por fim, fazendo um comparativo entre outras formas de produção de energia, os ventos são mais constantes e confiáveis do que, por exemplo, a incidência solar, que é afetada pela presença de nuvens, não ocorre no período noturno e varia significativamente entre os períodos de verão e inverno. Além disso, as turbinas eólicas podem ser implantadas em regiões marítimas (as designadas eólicas offshore), o que reduz o efeito de poluição visual (STANO JÚNIOR & TIAGO FILHO, 2007).

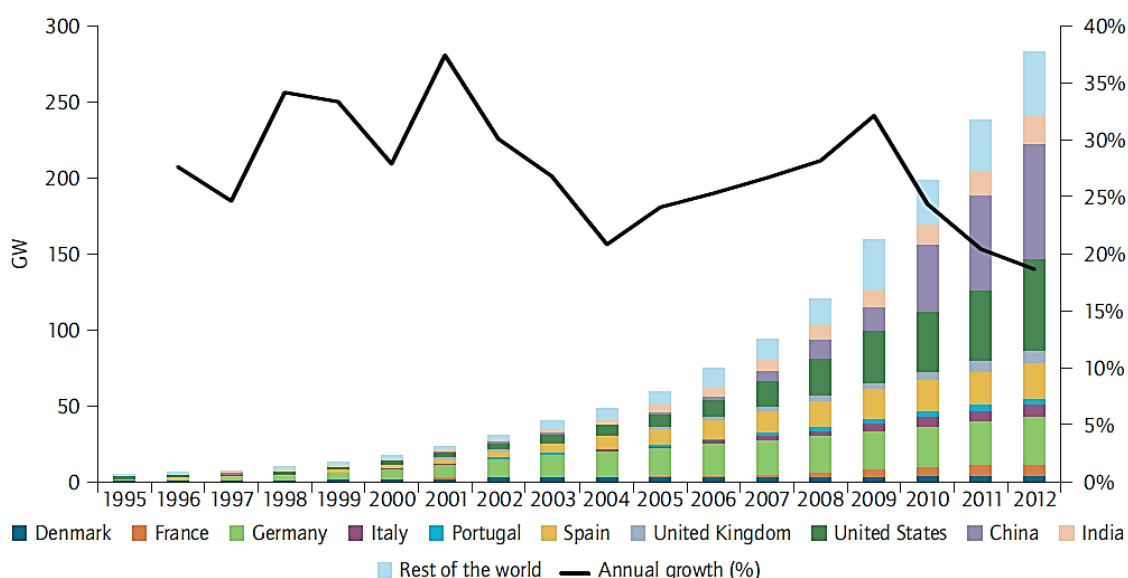
### 2.3 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA

Embora sem documentos comprobatórios, acredita-se que, há pelo menos 5.000 anos, a energia eólica começou a ser utilizada pelos egípcios e fenícios para a movimentação de barcos e velas. Com o desenvolvimento da agricultura, surgiu a necessidade de ferramentas que substituíssem o esforço humano e animal para a

realização de atividades como moagem de grãos e bombeamento de água. Os primeiros registros históricos da utilização de cata-ventos de eixo vertical datam de 1.700 AC, na Mesopotâmia, para fins de irrigação (BANDEIRA, 2011).

Há cerca de 130 anos atrás, no final do século XIX os primeiros moinhos foram construídos com o propósito de gerar energia, surgindo assim o conceito de turbina eólica. De lá para cá, vê-se assistir a uma substituição gradual do sistema de moinhos convencionais por aerogeradores modernos. Em 1940, em plena segunda guerra mundial, com a necessidade energética a subir a pico, a maior turbina eólica construída até a data, com uma capacidade de 1.25 MW foi instalada em Vermont, Estados Unidos (CARVALHO, 2003).

Atualmente, a indústria da produção de energia eólica vem experimentando um expressivo crescimento em relação à última década, com uma capacidade global instalada de 18GW no ano de 2000 para, aproximadamente, 300 GW em 2013, representando um aumento em mais de 1500%. A energia eólica propicia cerca de 2,5% da demanda global de eletricidade, mas há países onde a energia eólica representa uma boa parcela de sua produção elétrica nacional. Como é o caso da Dinamarca que 30% da sua produção nacional de energia é provida por parques eólicos, assim como Portugal com 20% e Espanha com 18%, como ilustrado na figura abaixo. Em termos comparativos, o Brasil ainda está muito atrasado frente aos outros países, visto que a energia eólica representa apenas 3,5% da sua matriz energética. (IEA, Technology Roadmap Wind Energy, 2013).



**Figura 3 - Comparativo energia eólica entre países.**  
**Fonte: IEA, Technology Roadmap Wind Energy, 2013.**

### 2.3.1 Energia eólica no Brasil

Os primeiros relatos do uso da energia eólica no Brasil datam do final do século XIX, com a utilização de moinhos de vento para o bombeamento de água em sistemas isolados e de pequena escala (MARQUES, 2004).

Hoje, segundo dados divulgados no Balanço Energético Nacional (BEN) do ano de 2016 pelo Ministério de Minas e Energia, no Brasil, cerca de 75,5% da sua matriz energética é renovável, considerando as grandes hidrelétricas, o que deixa o país em uma posição de destaque, uma vez a média mundial é de 14%. Porém, quando se trata de energias alternativas, como a energia eólica, este percentual cai para 3,5% do total da matriz energética.

O contra-senso é que o Brasil tem grande potencial para elevar esse percentual e investir mais em energias alternativas, pois possui características bastante favoráveis, como a extensão territorial, a mão-de-obra e o desenvolvimento tecnológico, que possibilitariam tanto complementar o abastecimento das tradicionais redes elétricas como produzir combustíveis.

Tal potencial eólico pode ser visto na figura abaixo, onde a região brasileira com maior potencial eólico é a região nordeste.

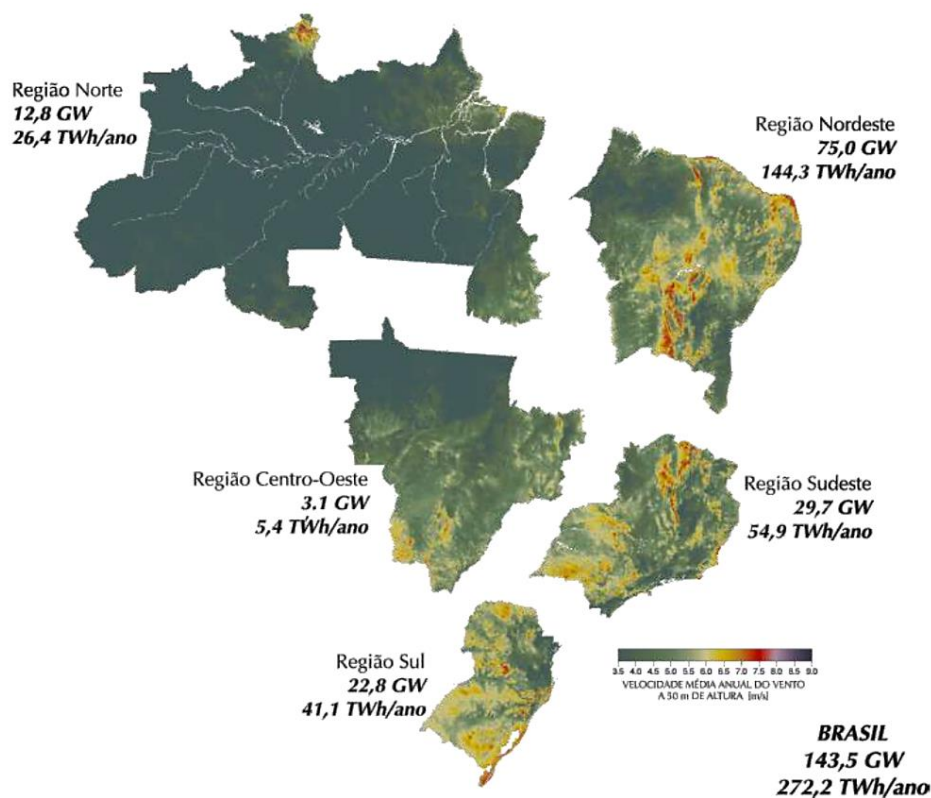


Figura 4 - Potencial eólico brasileiro.

Fonte: AMARANTE, 2001.

Por fim, como ilustra a figura anterior, com a estimativa do potencial eólico brasileiro em 2001, o Brasil poderia produzir 272,2 [TWh/ano] de energia. Baseado nessas estimativas, em 2017 foram explorados 42,38 [TWh] dos 272,2 [TWh] de potencial produtivo. Caso fosse explorado em sua totalidade, esta energia seria o suficiente para suprir cerca de 9,6% de toda a demanda energética brasileira de 2017, contra os 1,20% que foram produzidos, o que demonstra que ainda há um potencial de mais de 6 vezes da produção atual de energia eólica (CEPEL, 2017).

### 2.3.2 Energia eólica em Portugal

A matriz energética portuguesa ainda hoje é caracterizada por forte dependência de combustíveis fósseis para a produção elétrica, contudo, como pode-se observar no quadro abaixo, o país sofreu uma mudança de padrão nas últimas duas décadas no que se refere à procedência das fontes de geração de energia.

**Quadro 1 - Distribuição matriz energética Portugal Continental.**

<b>Ano</b>	<b>Fóssil</b>	<b>Hídrica</b>	<b>Eólica</b>	<b>Bioenergia</b>	<b>Solar</b>
<b>2000</b>	68,25%	30,48%	0,40%	0,88%	0,00%
<b>2001</b>	63,60%	34,94%	0,60%	0,87%	0,00%
<b>2002</b>	77,94%	20,21%	0,86%	0,99%	0,00%
<b>2003</b>	59,31%	38,50%	1,18%	1,01%	0,00%
<b>2004</b>	70,98%	25,17%	1,98%	1,88%	0,00%
<b>2005</b>	80,08%	11,80%	4,15%	3,98%	0,00%
<b>2006</b>	64,10%	25,29%	6,50%	4,11%	0,00%
<b>2007</b>	62,55%	23,89%	9,35%	4,16%	0,05%
<b>2008</b>	65,40%	16,99%	13,64%	3,90%	0,07%
<b>2009</b>	60,73%	18,95%	16,28%	3,74%	0,30%
<b>2010</b>	44,54%	32,43%	18,02%	4,59%	0,42%
<b>2011</b>	51,15%	24,42%	18,60%	5,30%	0,54%
<b>2012</b>	54,30%	15,16%	23,52%	6,18%	0,85%
<b>2013</b>	38,08%	30,45%	24,46%	6,07%	0,94%
<b>2014</b>	36,04%	32,87%	24,01%	5,88%	1,20%
<b>2015</b>	49,33%	19,85%	23,40%	5,85%	1,57%
<b>2016</b>	42,22%	29,76%	21,81%	4,81%	1,40%
<b>2017</b>	57,91%	13,46%	21,96%	5,15%	1,52%

Fonte: <http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>.

Como pode ser observado no quadro anterior, a partir do ano 2000 houve um aumento expressivo do uso de energia eólica, com a atenuação, mesmo que branda, da utilização de combustíveis fósseis.

A partir de 2005, verificou-se um acréscimo gradual da parcela da geração de energia oriunda dos ventos, com uma taxa de crescimento anual média de 4%. Além disso, é possível observar ainda que outras fontes de energia renovável, como por exemplo, biomassa e solar têm aumentado a sua representatividade ano após ano, mesmo que de forma menos expressiva

Ademais, desde o ano de 2000, a potência instalada nos centros produtores de energia elétrica de fontes renováveis tem aumentado incessantemente, dos quais a energia de origem eólica, cuja potência instalada passou de 83 [MW] em 2000 para 5.236 [MW] em 2017, teve um acréscimo de 63 vezes. Esses números comprovam a inegável intenção do governo português, fundamentada em suas políticas públicas de investimento, em incentivar o uso de fontes renováveis como alternativa às fontes energéticas alternativas (APREN, 2018).

## 2.4 COMPONENTES DE UMA TORRE EÓLICA

A produção de energia elétrica através da fonte eólica fundamenta-se no princípio da transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica que então é convertida em energia elétrica. Os ventos impulsionam as pás, que provocam o giro do rotor. Esse movimento é transmitido para o conversor, que, através de um processo de indução eletromagnética, transforma a energia cinética de rotação em energia elétrica (KOTO, 2009).

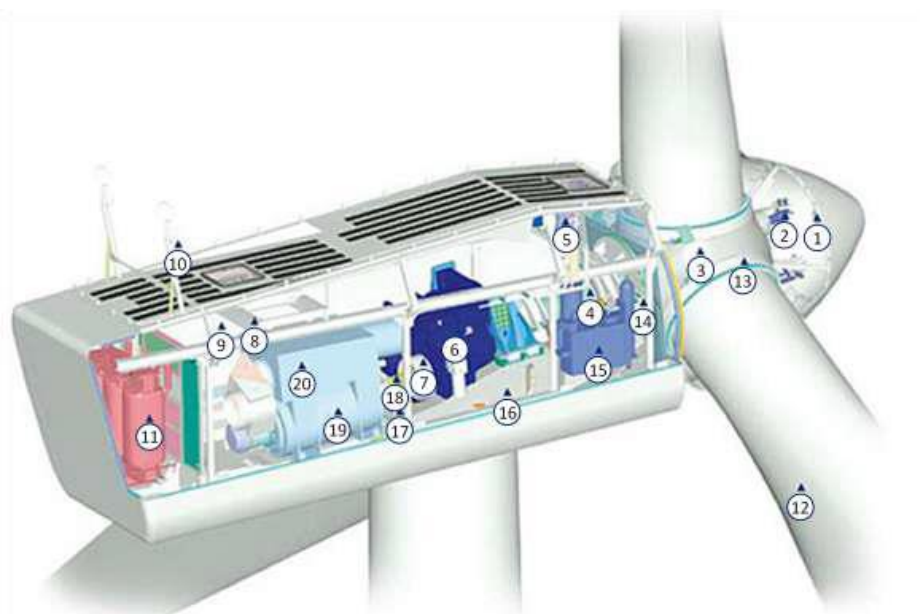
Desta forma, segundo o CRESEB (2006), um aerogerador é composto pelos seguintes subconjuntos:

- Rotor: componente que efetua a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. No rotor são fixadas as pás da turbina. Todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes através de uma caixa multiplicadora;
- Nacele: compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador, o qual pode incluir: caixa multiplicadora, freios,

embreagem, mancais, controle eletrônico, sistema hidráulico, como pode ser visto na imagem logo abaixo.

- Torre: elemento que sustenta o rotor e a nacela na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliçada ou tubular) ou de concreto.

Tais componentes podem ser vistos na figura abaixo para uma melhor compreensão, na qual representa um aerogerador de grandes proporções e de eixo horizontal.



- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1 – Controlador de Cubo               | 11 – Transformador de alta tensão        |
| 2 – Controle <i>pitch</i>             | 12 – Pás                                 |
| 3 – Fixação das pás no cubo           | 13 – Rolamento das pás                   |
| 4 – Eixo principal                    | 14 – Sistema de trava do rotor           |
| 5 – Aquecedor de óleo                 | 15 – Sistema hidráulico                  |
| 6 – Caixa multiplicadora              | 16 – Plataforma da nacela                |
| 7 – Sistema de freios                 | 17 – Motores de posicionamento da nacela |
| 8 – Plataforma de serviços            | 18 – Luva de acoplamento                 |
| 9 – Controladores e Inversores        | 19 – Gerador                             |
| 10 – Sensores de direção e velocidade | 20 – Aquecimento de ar                   |

**Figura 5 - Componentes de um aerogerador.**

**Fonte: CRESESB (2006).**

Devido a velocidade de rotação das pás ser consideravelmente baixa, geralmente utilizam-se multiplicadores de velocidade entre o rotor e o gerador, contudo, este precisa ser pequeno e leve, pois está localizado no topo da torre, que suporta o peso de todo o conjunto em uma estrutura bastante esbelta. Isto é de crucial

importância para que o centro de gravidade da estrutura como um todo não fique muito elevado a ponto de gerar demasiados esforços nas fundações das torres devido a incidência de ventos e/ou sismos (ROSA & TIAGO FILHO, 2007).

Já em relação aos materiais mais empregados para a fabricação das pás de turbinas eólicas aço, alumínio e materiais compósitos de madeiras, fibra de vidro e fibra de carbono são os mais utilizados. Uma pá deve ser leve o suficiente para minimizar as cargas inerciais e giroscópicas as quais contribuem para a fadiga da pá e atender os requisitos de rigidez e resistência mecânica. Desta forma, o material ideal para a fabricação da pá deve apresentar uma boa relação de resistência por peso e atender requisitos de custo e facilidade de fabricação (VERGARA, 2005).

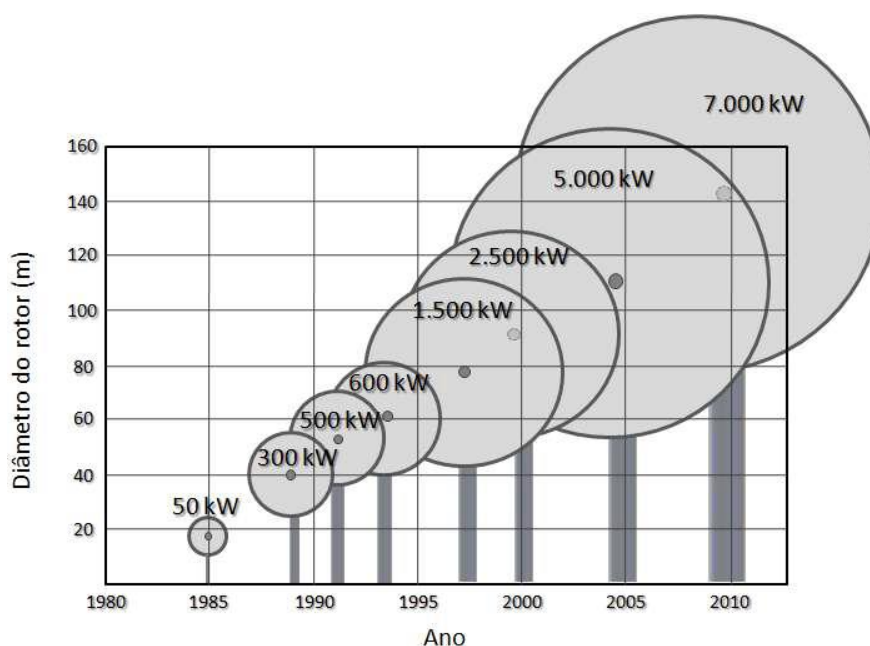
Já em relação ao layout das pás de uma turbina eólica, esta pode ter duas configurações diferentes, girando em torno de um eixo horizontal ou vertical. A forma mais comum de turbina é o tipo de eixo horizontal (HAWT), no entanto, pesquisas experimentais estão cada vez mais estudando turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT). As turbinas eólicas de eixo vertical são adequadas para serem montadas no topo de edifícios ou instaladas em locais mais altos, em vez de no nível do solo (WIND BASICS, 2014).

Uma variedade de conceitos diferentes para HAWT e VAWT tem sido proposta ao longo dos anos, conforme ilustrado na figura abaixo.



**Figura 6 - Diferentes tipos de aerogeradores**  
Fonte: SHARPLEY, 2014.

Normalmente, as turbinas eólicas disponíveis comercialmente têm de duas a três pás, embora muitos outros projetos tenham sido testados. Hoje em dia, há uma tendência em aumentar a produtividade e eficiência das turbinas, de forma a aumentar a área de abrangência das pás. Como pode ser visto na figura abaixo, houve um aumento significativo no tamanho das pás ao longo dos anos, levando a ter projetos de engenharia cada vez mais ousados e complexos.



**Figura 7 - Tamanho das pás ao longo dos anos**

**Fonte: SHARPLEY, 2014.**

As melhorias tecnológicas da turbina têm sido uma das principais razões para o aumento significativo da capacidade da última década, mas mesmo com essas melhorias, as turbinas devem ser adequadamente mantidas para alcançar a produção ideal e atingir as metas de receita. Assim, além de conceber uma estrutura que consiga suprir as necessidades estruturais, a monitoração é indispensável para garantir que as turbinas operem em ótimas condições e máximo desempenho (SHARPLEY, 2014).

Desta forma, o sistema de controle, que conta com os subsistemas de proteção contra sobrecorrente e curto-circuito, de para-raios, de prevenção à subtensão e sobretensão e, por último, contra sobrefrequência e subfrequência, tem o papel de monitorar, otimizar e proteger as turbinas eólicas e a rede elétrica de operações indevidas, garantindo um correto funcionamento e uma geração de energia competitiva (ROSAS E ESTANQUEIRO, 2003).

### 3 METODOLOGIA

Para a elaboração do presente estudo foi utilizado um projeto existente de uma torre eólica de pequeno porte, semelhante a estrutura de mesma função situada ao lado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB). Em seguida, os dados coletados foram introduzidos no *software AutoCad* e então modelados no *software SolidWorks* para, posteriormente, analisá-los em um programa de elementos finitos (neste presente estudo foi utilizado o *software ANSYS*) a fim de se obter as frequências vibração e seus deslocamentos modais. Após isso, foi realizado os procedimentos de cálculo com o objetivo de quantificar dos efeitos do vento sobre a estrutura analisada.

#### 3.1 DADOS FUNDAÇÃO E PROCESSOS CONSTRUTIVOS

A fundação proposta da torre metálica em estudo é muito semelhante com a torre presente nas proximidades da ESTIG-IPB. Por este motivo, será apresentado as fundações realizadas nesta torre, sendo as imagens uma contribuição do departamento de engenharia do IPB para este trabalho.

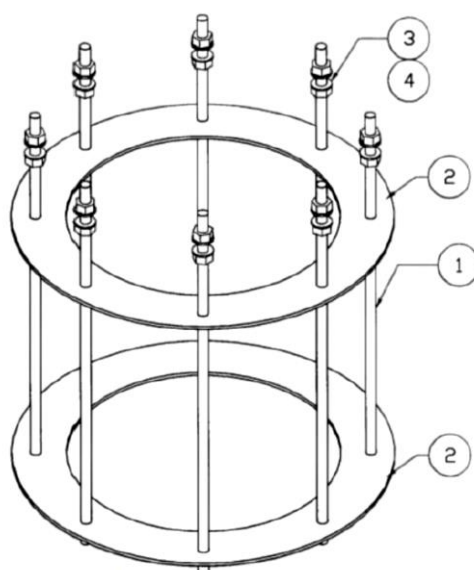
O processo de construção das fundações começa pela a escavação do local com posterior alocação das armaduras, conforme figura abaixo. Além disso, é colocado, neste caso, 16 chumbadores que garantem a fixação da torre à fundação. Nota-se também que são deixados tubos para a passagem de cabos elétricos.



**Figura 8: Escavação e alocação das armaduras.**  
Fonte: Acervo do IPB.

São utilizadas também duas cérceas para garantir a correta geometria dos chumbadores, como pode ser visto na figura abaixo. Normalmente uma delas (a superior) é retirada logo após a concretagem e antes do encaixe da base da torre, contudo, neste caso foi mantido, por motivos de precaução de alinhamento dos chumbadores.

Acima do topo da fundação são instaladas porcas de nivelamento que garantem a correta disposição e verticalidade da torre metálica após instalada, corrigindo possíveis desníveis da fundação. A fundação é uma sapata quadrada com 1,5 metros de dimensão e concreto C25/30.



- 1- Chumbadouros
- 2- Cérceas
- 3/4- Porcas de nivelamento

**Figura 9 - Cérceas e chumbadores**

**Fonte: Polícia, 2015.**



**Figura 10: Concretagem e porcas de nivelamento.**

**Fonte: Acervo do IPB**

### 3.2 DADOS GEOMÉTRICOS E ESTRUTURAIS

A torre metálica em estudo foi projetada em aço galvanizado S275, possuindo um peso específico de  $78,5 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ . Os dados geométricos podem ser vistos na figura abaixo, onde a altura da torre é de 20 metros, a base possuindo um diâmetro de 75 centímetros e o topo, um diâmetro de 35 centímetros.

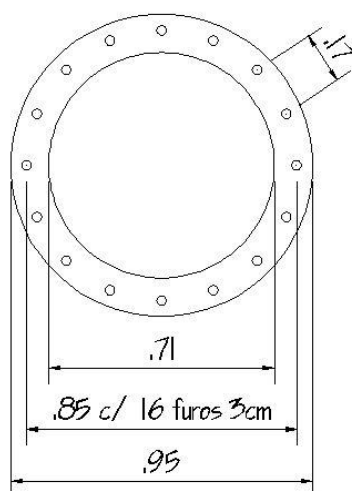


**Figura 11 - Dados geométricos torre.**

**Fonte: o autor.**

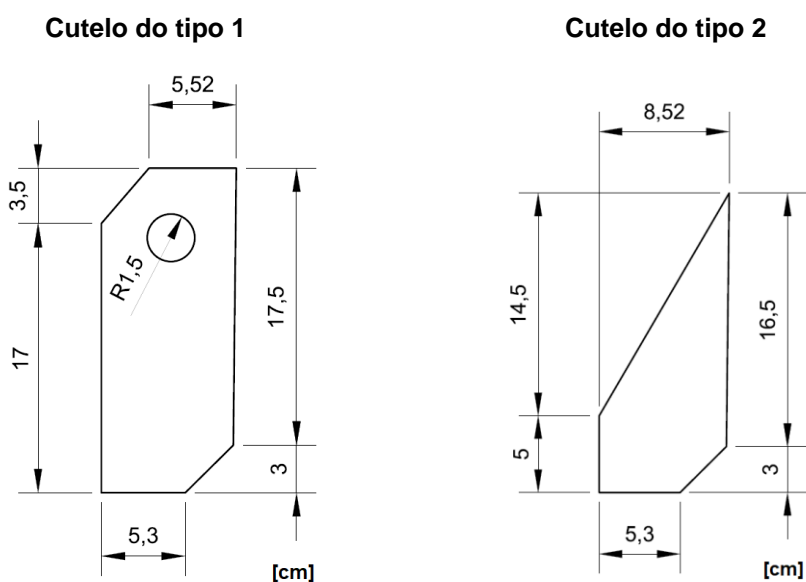
A torre possui um formato hexadecagonal (16 lados), sendo os diâmetros da base e topo em relação a um polígono de 16 lados inscrito em uma circunferência. Além disso, é fabricada com chapas de aço com 6 milímetros de espessura.

Na base da torre, possui uma flange circular de 95 centímetros de diâmetro externo, diâmetro interno de 71 cm, espessura de 2 centímetros e feita do mesmo material da torre, aço galvanizado e possuindo 16 furos de diâmetro 3 cm para a passagem dos chumbadores. Como pode ser visto na figura a seguir.



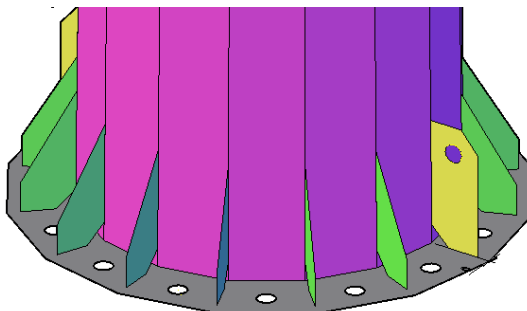
**Figura 12 - Detalhe geométrico flange**  
**Fonte: O autor.**

Conectados a flange e a torre, estão presentes 16 cutelos que possuem a função de dar mais estabilidade, suporte e resistência à torre. Destes, 14 são cutelos do tipo 2 e 2 são cutelos do tipo 1, como pode ser visto na figura abaixo. Ambos possuem a mesma espessura da torre, 6 milímetros e feitos de aço galvanizado.



**Figura 13: Dados geométricos dos cutelos de tipo 1 e 2.**  
**Fonte: o autor.**

A disposição dos cutelos pode ser observada na imagem abaixo, onde possuem uma distribuição homogênea, soldados em cada uma das 16 arestas da torre.



**Figura 14 - Disposição dos cutelos**  
Fonte: o Autor.

### 3.3 DADOS DO AEROGERADOR

O aerogerador a ser suportado pela torre eólica em estudo possui uma potência nominal de 1,4 [kW], com uma velocidade de vento nominal de 16 [m/s], sendo a velocidade do vento de entrada igual a 2,5 [m/s] e possui eixo horizontal. A máxima velocidade do vento a que a turbina resiste é de 60 [km/h]. O rotor pesa 75 [kg] e tem um diâmetro de 3,12 metros, com uma área de varredura de 7,65 [m<sup>2</sup>]. A altura do mastro varia entre 12 e 24 metros. Ainda, o equipamento possui um sistema de início automático e não utiliza de gerador assíncrono. Outras informações estão contidas no quadro a seguir.

**Quadro 2: Dados técnicos adicionais do aerogerador.**

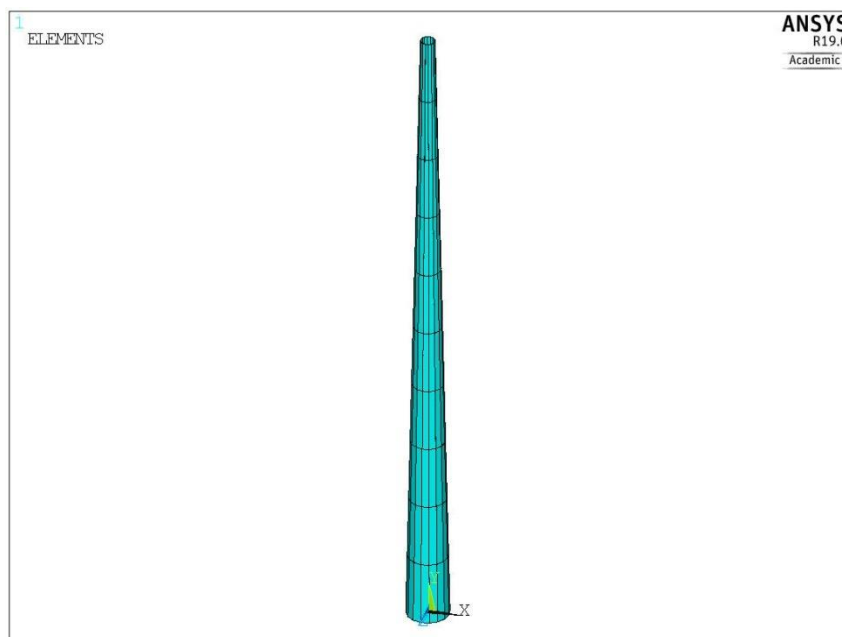
INFORMAÇÕES ADICIONAIS	
Rpm máximo	775 <sup>1</sup>
Tipo da caixa de velocidade	Não possui
Sistema de frenagem	Circuito curto de gerador
Número de pás	3
Material das pás	Compósito de fibra de vidro
Voltagem de saída	24 – 240 [V (DC)]
Temperatura mínima de operação	-30 [°C]
Temperatura máxima de operação	+50 [°C]
Níveis acústicos a distância de 20 metros <sup>2</sup>	< 60 [DB]
Tempo de vida útil	20 [anos]
Sistema de controle de arranque	Cata-vento
<sup>1</sup> Considerando a velocidade do vento nominal	
<sup>2</sup> Velocidade do vento igual a 10 [m/s]	

**Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.**

### 3.4 MODELAÇÃO NUMÉRICA

De modo a obter os modos de vibração da estrutura em estudo, foi realizada uma análise simplificada no *software* ANSYS utilizando um modelo de elementos finitos de casca com seção transversal variável, obedecendo as dimensões estabelecidas no item 3.2., sendo primeiramente modelado pelo *software* SolidWorks. Foram utilizados 16 elementos de casca trapezoidais com 6 mm de espessura, tendo a base maior 0,146 m e a base menor 0,068 m de comprimento.

Foi considerado um aço com as seguintes propriedades: densidade de 78,5 [kN/m<sup>3</sup>], módulo de elasticidade de 210 [GPa] e coeficiente de Poisson de 0,3. A torre foi dividida em 10 elementos finitos de 2,00 metros cada e a base foi considerada como engastada nos furos da flange, onde seriam os chumbadores. O topo foi considerado como uma extremidade livre, conforme figura a seguir.



**Figura 15: Detalhes da seção transversal utilizado no modelo numérico.**  
**Fonte: O autor.**

Para tanto, foram considerados algumas simplificações no modelo analisado. A torre foi modelada de forma a ser simétrica, sem haver presença de escada ou qualquer elemento que gerasse assimetria; o aerogerador não foi considerado na modelagem, apenas o seu peso próprio concentrado axialmente na extremidade superior da torre e os cutelos foram considerados de um tipo só, sendo adotado 16 cutelos do tipo 2, conforme figura 13.

Foi então realizada uma análise modal, com obtenção dos respectivos modos de vibração, representado no quadro abaixo.

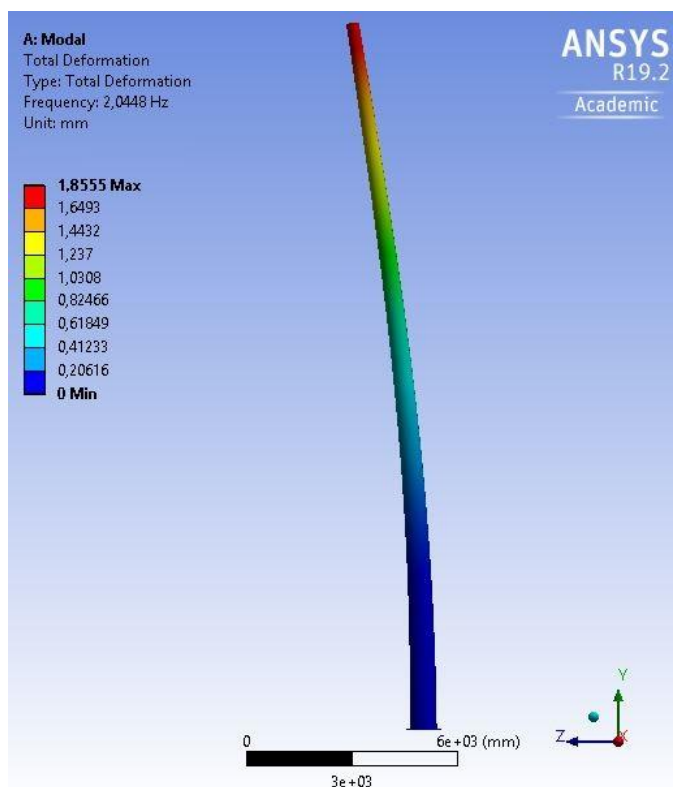
**Quadro 3 - Frequências de vibração**

Modos	Frequência (Hz)	Direção
1	2.04	Paralelo
2	2.06	Transversal
3	9.41	Paralelo
4	9.52	Transversal
5	23.83	Paralelo
6	24.91	Transversal

**Fonte: o autor.**

Devido as simplificações impostas no modelo numérico, visando a simetria da estrutura, os primeiros modos (1 e 2) possuem a mesma frequência de vibração e

consequentemente, mesmos deslocamentos. A única diferença é que o primeiro vibra na direção do vento, ou seja, paralelamente ao escoamento e o segundo vibra perpendicularmente ao escoamento do mesmo. Desta forma, pode ser visto na imagem abaixo a deformação da torre no seu primeiro e/ou segundo modo.



**Figura 16 - Deformação torre.**

**Fonte: o autor.**

Com base nos deslocamentos apresentados pelo programa, pode-se encontrar a função modal da estrutura e aproximá-los em uma função polinomial de quarto grau, atentando para a condição de contorno onde a primeira derivada desta função com a variável nula ( $x=0$ ) deve resultar em zero, para assegurar o engastamento da base. Tais dados podem ser observados no quadro e figura a seguir.

Quadro 4 - Função modal

Altura (m)	Deslocamento (mm)	Deslocamento modal
0.0	0.000	0.000
2.0	0.024	0.013
4.0	0.090	0.049
6.0	0.198	0.107
8.0	0.347	0.187
10.0	0.534	0.288
12.0	0.756	0.407
14.0	1.007	0.543
16.0	1.279	0.689
18.0	1.565	0.843
20.0	1.855	1.000

Fonte: O autor.

Função modal - módulo 1 - 2

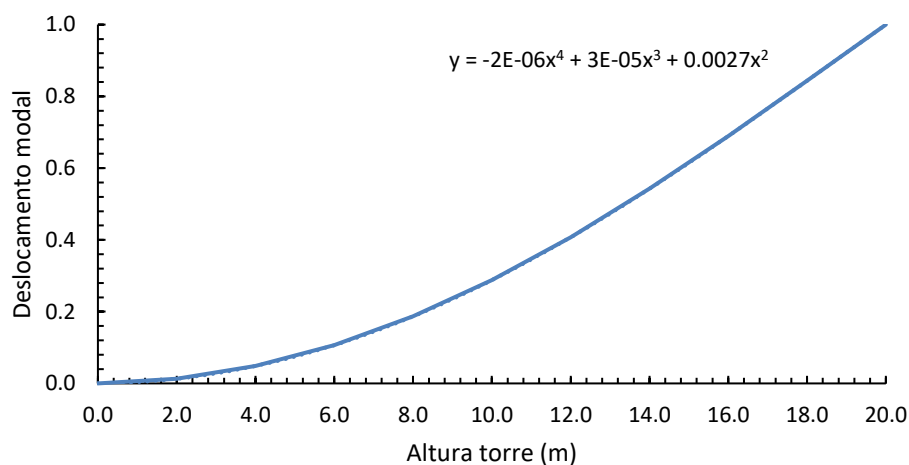


Figura 17 - Função modal.

Fonte: O autor.

### 3.5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O dimensionamento estrutural da torre de suporte do aerogerador foi realizado segundo as recomendações da norma EN 1990 – Bases para o projeto de estruturas de 2009; EN 1991-1-4 – Ações em estruturas (ações gerais - ações do vento) de 2010; EN 1993-3-1 – Projeto de estruturas de aço (torres, mastros e chaminés) de 2009 e

EN 61400-2 – Turbinas eólicas (requisitos de dimensionamento de pequenas turbinas eólicas) de 2006.

Na norma EN 61400-2, relativa a turbinas eólicas, os aerogeradores são caracterizados segundo três categorias, que se distinguem pela área de varrimento das pás da turbina: turbinas com uma área de varrimento superior a  $200\text{m}^2$ , turbinas cuja área de varrimento é inferior a  $2\text{m}^2$  e turbinas cuja área de varrimento se encontra entre 200 e  $2\text{m}^2$ , sobre as quais esta dissertação vai focar. Este tipo de turbinas são designados de SWT (Small Wind Turbines).

De modo geral, as estruturas devem ser projetadas de modo a atender requisitos básicos como o suporte a todas as ações existentes durante sua fase de construção e utilização, sem deixar de cumprir com as condições de utilização especificadas. Sendo assim, o dimensionamento de uma estrutura deve evitar, reduzir ou eliminar riscos, considerando condições normais de utilização, assim como situações de projetos transitórias, acidentais e sísmicas abrangendo, de forma razoável, todas as condições possíveis de ocorrer no decorrer da execução e utilização da estrutura.

Neste contexto, a norma EN 61400-2 prevê para o dimensionamento de estruturas de suporte à aerogeradores a consideração de ações e influências ambientais, bem como as ações relacionadas com a instalação e manutenção de equipamentos. Ainda, a EN 1990 classifica as ações como variáveis, permanentes ou acidentais, diretas ou indiretas, fixas ou livres e estáticas ou dinâmicas (dependendo de sua natureza e resposta estrutural). Neste estudo de caso será atribuída uma atenção especial aos efeitos das ações ambientais, tanto pela sua importância na estrutura quanto pela especificidade de cálculo requerida.

### 3.5.1 Modelação das ações do vento

Considerando a estrutura objeto de estudo, as ações provocadas pelo vento são de fundamental importância no dimensionamento estrutural da torre metálica, visto que são essas as principais ações incidentes sobre a mesma. As ações do vento variam ao longo do tempo e agem de forma direta sobre as superfícies exteriores das construções em forma de pressões. Devido às pressões exercidas sobre os elementos

da estrutura surgem forças perpendiculares à superfície, podendo haver também forças tangenciais de atrito, como ocorre em grandes construções.

Neste contexto, a ação do vento, segundo a EN 1991.1.4, pode ser representada por um conjunto simplificado de pressões ou forças com efeitos similares aos causados por ventos turbulentos. Ainda, as ações do vento são classificadas como variáveis fixas e, portanto, são utilizados valores de referência característicos para velocidade do vento ou pressão dinâmica, sendo considerado um tempo de retorno de 50 anos, por mais que o tempo de vida útil da estrutura em estudo seja 25 anos (JACINTO, 2014).

A ação provocada pelo vento varia com o tempo e, também, com a localização geográfica da estrutura. Com o intuito de quantificar o valor de referência da velocidade do vento, Portugal encontra-se dividido em duas regiões principais (zona A e zona B), pertencendo a zona B os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 quilômetros de largura ou a altitudes superiores a 600 metros. Os demais territórios nacionais são classificados como zona A. Neste caso, os valores referenciais para velocidade do vento estão indicados no Quadro 5.

**Quadro 5: Valor básico da velocidade de referência do vento.**

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

**Fonte: EN 1991.1.4 (2010).**

Para o presente estudo foi considerada a velocidade de  $v_{b,0}$  igual a 30 [m/s], visto que Bragança tem uma altitude superior a 600 metros.

O terreno pode ser classificado em quatro categorias distintas, como apresentado no quadro a seguir. Para o presente estudo foi considerado um terreno de classificação II.

**Quadro 6: Categorias de terreno.**

<b>Categoria de terreno</b>	<b>Classificação</b>
0	Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar
I	Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m.

**Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4. Quadro 4.1.**

A partir do valor básico de referência da velocidade do vento ( $v_{b,0}$ ) calcula-se o valor de referência da velocidade do vento ( $v_b$ ), definido em função da direção do vento e da época do ano, à uma altura de 10 metros acima da superfície de um terreno de categoria II, conforme a equação abaixo.

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \quad (1)$$

Sendo:

$C_{dir}$ : coeficiente de direção;

$C_{season}$ : coeficiente de sazonalidade;

$v_{b,0}$  valor básico da velocidade de referência do vento.

Desta forma, considerando os coeficientes de direção e sazonalidade iguais a 1, como recomendado pela EN 1991.1.4, tem-se que:

$$v_b = v_{b,0} \quad (2)$$

### 3.5.2 Vibrações na direção do escoamento

Admitindo uma altura  $z$  acima do nível do solo, a velocidade média do vento ( $v_m$ ) vai depender da rugosidade e orografia do terreno, assim como do valor de referência da velocidade do vento ( $v_b$ ) e será determinada a partir da equação abaixo.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (3)$$

Sendo:

$c_r(z)$ : coeficiente de rugosidade;

$c_0(z)$ : coeficiente de orografia, considerado igual a 1,0, como recomendado pela EN 1991.1.4

$v_b$ : valor de referência da velocidade do vento.

Para o cálculo do coeficiente de rugosidade ( $c_r$ ) deve-se levar em consideração a variação da velocidade em decorrência da altura acima do nível do solo e da rugosidade do terreno.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min}$$

Sendo:

$z_0$ : comprimento de rugosidade (conforme Quadro 7);

$k_r$ : coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade  $z_0$ , calculado a partir da equação 5;

$z_{\min}$ : altura mínima;

$z_{\max}$ : a ser considerada igual a 200m.

Desta forma, conforme o quadro a seguir e considerando um terreno de categoria II,  $z_{\min}$  é igual a 2 metros.

$$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (5)$$

Sendo:

$z_{0,II}$ : 0,3 m (conforme Quadro 7).

**Quadro 7: Categorias e parâmetros de terrenos.**

<b>Categoria de terreno</b>	<b><math>z_0</math> [m]</b>	<b><math>z_{min}</math> [m]</b>
0	0,003	1
I	0,01	1
II	0,05	2
III	0,3	5
IV	1,0	10

**Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4. Quadro 4.1.**

Como supracitado, a estrutura metálica de suporte em estudo encontra-se em uma região de classificação II.

### 3.5.3 Fator de resposta de rajada

A norma EN 1993.3.1 prevê a análise à fadiga em relação as vibrações na direção do escoamento do vento, vibrações perpendiculares à atuação da força e a resposta de elementos individuais. Neste caso, considerando que a torre metálica em análise possui apenas um elemento estrutural, não será realizada a análise das respostas de elementos individuais.

Além disso, devido a simplificação da modelagem da torre, de forma a torná-la simétrica em todas as direções, as vibrações paralelas e perpendiculares à atuação da força do vento são iguais, assim, as funções de forma e frequências serão as mesmas.

As tensões de fadiga devido a ação de rajadas de vento são obtidas após a determinação das durações anuais de diferentes velocidades médias de vento em

diferentes direções. Deste modo, o fator de resposta de rajada ( $G$ ) é definido pela equação abaixo.

$$G = c_e(z) \cdot c_s c_d - 1 \quad (6)$$

Sendo:

$c_e(z)$ : coeficiente de exposição, definido pela equação 9;

$c_s c_d$ : coeficiente estrutural.

Segundo a EN 1993.3.1 a variação em relação aos valores médios de velocidade do vento obedece a uma distribuição normal, com o desvio padrão definido pela equação abaixo.

$$\sigma = \frac{G}{4} \cdot v_{med}(z) \quad (7)$$

Sendo:

$G$ : fator de rajada do vento, definido pela equação 6.

$v_{med}$ : velocidade média do vento, com período de retorno de 1 ano e ciclos de 10 minutos.

A velocidade média do vento é obtida através da análise da figura a seguir.

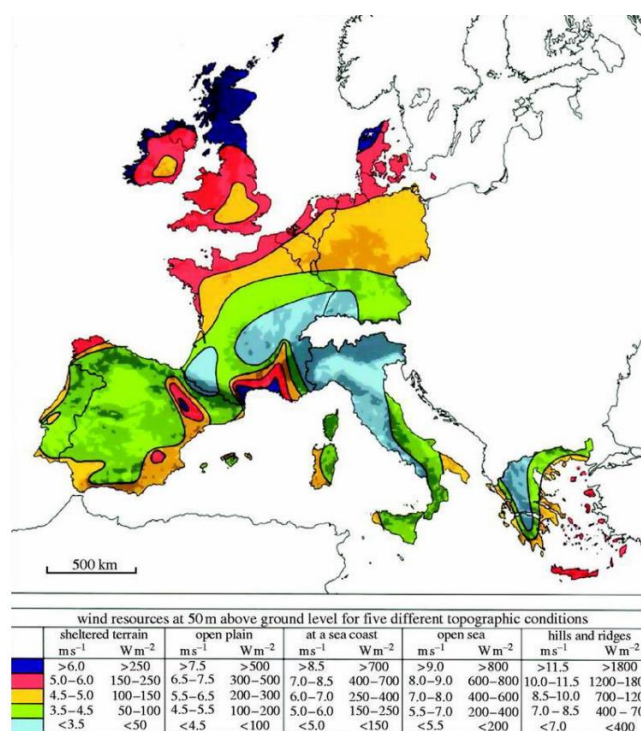


Figura 18: Velocidades médias anuais do continente Europeu.

Fonte: Polícia, 2015. Figura 4.3.

Analisando a figura 18 e considerando o local de instalação da torre metálica em estudo como “*open plain*”, tem-se uma velocidade média entre 4,5 e 5,5 [m/s]. Considera-se então o cenário mais crítico ( $v_{med} = 5,5$  [m/s]).

Neste caso, o intervalo de tensões  $\Delta\sigma_{si}$  considerado deve ser de 1,1 vezes a diferença entre a tensão causada com a incorporação do fator de resposta de rajada (G) e a tensão devido a velocidade média ( $v_{med}$ ). Ainda, a norma define um número equivalente de ciclos ( $N_i$ ) que pode ser obtido através da equação abaixo.

$$N_i = \frac{10^5 T}{50} \quad (8)$$

Sendo:

T: tempo de vida em anos previsto para a estrutura. No caso do presente estudo, considerou-se um tempo de vida igual a 25 anos.

#### 3.5.4 Coeficiente de exposição

Para o cálculo do coeficiente de exposição ( $c_e$ ) são considerados fatores como a pressão dinâmica de pico ( $q_p$ ), intensidade da turbulência do vento ( $I_v$ ) e o desvio padrão da turbulência ( $\sigma_v$ ), conforme apresentado nas equações abaixo.

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (9)$$

Sendo:

$q_p(z)$ : pressão dinâmica de pico à altura  $z$ , definida pela equação 10;

$q_b$ : pressão dinâmica de referência, definida pela equação 13.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (10)$$

Sendo:

$I_v(z)$ : intensidade de turbulência do vento à altura  $z$ , definida na equação 11;

$\rho$ : massa volúmica do ar, a qual depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. O valor recomendado, conforme EN 1991.1.4 é de  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ;

$v_m(z)$ : velocidade média do vento à uma altura  $z$ .

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (11)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min}$$

Sendo:

$\sigma_v$ : desvio padrão da turbulência, definido pela equação 7;

$k_1$ : coeficiente de turbulência. O valor de  $k_1$  recomendado é 1,0, conforme EN 1991.1.4;

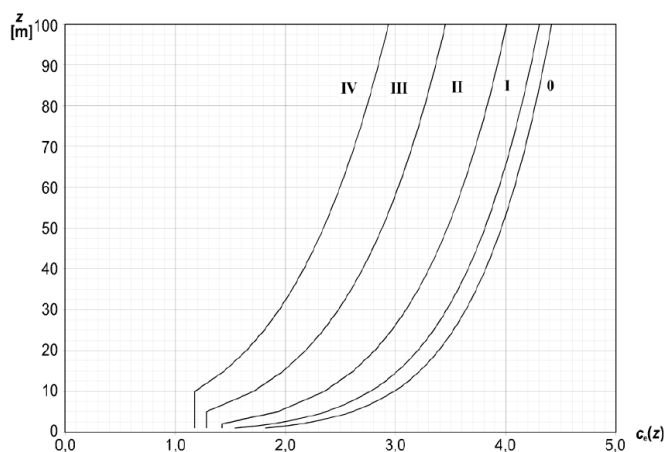
$c_0$ : coeficiente de orografia;

$z_0$ : comprimento de rugosidade.

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_1 \quad (12)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (13)$$

Uma outra forma de encontrar o coeficiente de exposição ( $c_e(z)$ ) é através da utilização de ábacos. Considerando um terreno plano com  $c_0$  igual a 1,0, o coeficiente  $c_e(z)$  é apresentado na figura 19 em função da altura  $z$  acima do nível do solo e da classificação do terreno.



**Figura 19: Coeficiente de exposição  $c_e(z)$  para  $c_0 = 1,0$  e  $k_1 = 1,0$ .  
Fonte: EN 1991.1.4. Figura 4.2.**

### 3.5.5 Coeficiente de força

Uma simplificação necessária para a utilização dos ábacos presentes no Eurocódigo EN1991.1.4 é considerar o tronco de cone de base hexadecagonal, que a torre em estudo possui, em um cilindro de mesma base que a base da torre e comprimento finito. Assim, o coeficiente de força ( $c_f$ ) pode ser obtido a partir da expressão a seguir.

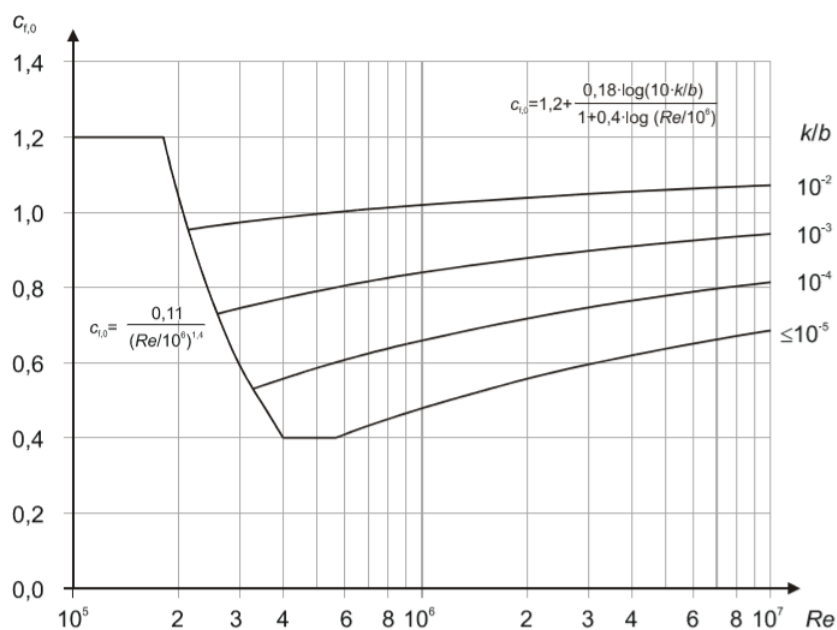
$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (14)$$

Sendo:

$c_{f,0}$ : coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento nas extremidades;

$\psi_\lambda$ : coeficiente de efeitos de extremidade.

Deste modo, utilizando um cilindro como simplificação para a base da torre metálica de suporte ao aerogerador, o coeficiente de força será definido com o auxílio da figura 20, levando em consideração o número de Reynolds do escoamento ( $Re$ ) e a rugosidade da superfície ( $k$ ) e o diâmetro da estrutura em questão ( $b$ ).



**Figura 20: Coeficiente de força, considerando uma base circular, com extremidades sem livre escoamento e diferentes valores de rugosidades equivalentes.**

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

O número de Reynolds foi obtido a partir da equação 15.

$$\text{Re} = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \quad (15)$$

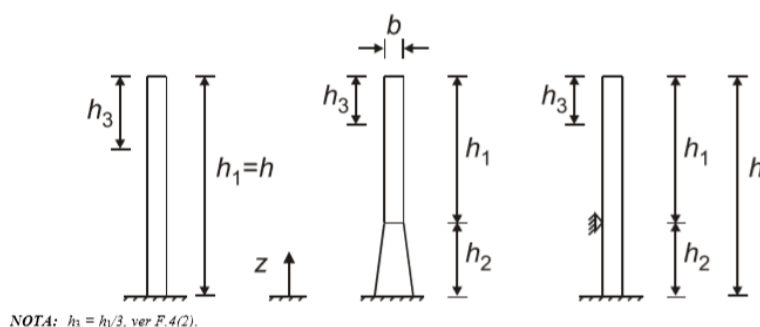
Sendo:

b: diâmetro (representação na figura 21);

v(z<sub>e</sub>): velocidade de pico à altura z<sub>e</sub>, definida pela equação 16;

ν: viscosidade cinemática do ar que é igual a 15 × 10<sup>-6</sup> [m<sup>2</sup>/s], como recomendado pela EN 1991.1.4.

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}} \quad (16)$$



**Figura 21: Propriedades geométricas de chaminés.**

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

Ainda, com o auxílio do quadro abaixo, é possível definir a rugosidade da superfície (k).

**Quadro 8: Rugosidade superficial equivalente.**

Tipo de superfície	Rugosidade [mm]
Vidro	0,0015
Metal polido	0,002
Revestimento liso com pintura	0,006
Pintura aplicada com pistola	0,02
Superfície lisa em aço	0,05
Ferro fundido	0,2
Aço galvanizado	0,2
...	...

...	...
Betão liso	0,2
Madeira aplainada	0,5
Betão rugoso	1,0
Madeira serrada, rugosa	2,0
Superfície com ferrugem	2,0
Alvenaria de tijolo	3,0

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

Para o presente estudo de caso, foi considerada uma superfície em aço galvanizado com rugosidade equivalente  $k$  igual a 0,2. Já o coeficiente de extremidade ( $\psi_\lambda$ ) é obtido através da análise do gráfico abaixo.

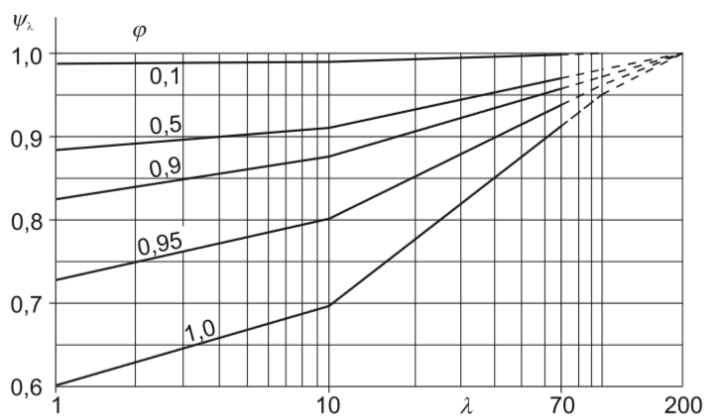
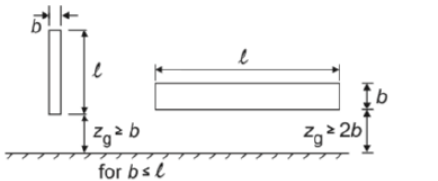
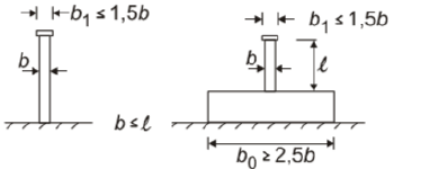
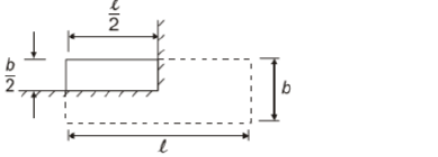
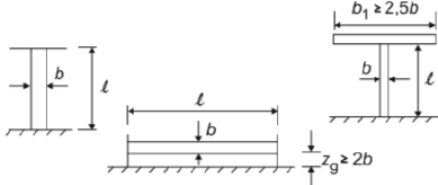


Figura 22: Coeficiente de extremidade.

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

A esbelteza da estrutura, considerando o índice de cheios igual a 1, foi determinada de acordo com as recomendações quadro 9. Para tanto, classificando a estrutura como de número 4, a esbelteza efetiva da mesma será de  $\lambda=70$ .

**Quadro 9: Esbelteza efetiva da estrutura ( $\lambda$ ).**

N.º	Posição da estrutura, vento perpendicular ao plano da figura	Esbelteza efetiva $\lambda$
1		<p>Para elementos com secção poligonal, perfis com arestas vivas e estruturas treliçadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- para <math>\ell \geq 50</math> m, o menor dos valores <math>\lambda = 1,4 \ell / b</math> ou <math>\lambda = 70</math>;</li> <li>- para <math>\ell &lt; 15</math> m, o menor dos valores <math>\lambda = 2 \ell / b</math> ou <math>\lambda = 70</math>.</li> </ul>
2		<p>Para cilindros de base circular:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- para <math>\ell \geq 50</math> m, o menor dos valores <math>\lambda = 0,7 \ell / b</math> ou <math>\lambda = 70</math>;</li> <li>- para <math>\ell &lt; 15</math> m, o menor dos valores <math>\lambda = \ell / b</math> ou <math>\lambda = 70</math>.</li> </ul>
3		<p>Para valores intermédios de <math>\ell</math>, deverá ser efectuada uma interpolação linear.</p>
4		<p>Para <math>\ell \geq 50</math> m o maior dos valores <math>\lambda = 0,7 \ell / b</math> ou <math>\lambda = 70</math>;</p> <p>para <math>\ell &lt; 15</math> m, o maior dos valores <math>\lambda = \ell / b</math> ou <math>\lambda = 70</math>.</p> <p>Para valores intermédios de <math>\ell</math>, deverá ser efectuada uma interpolação linear.</p>

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

### 3.5.6 Coeficiente estrutural

O coeficiente estrutura  $c_{s,c_d}$  considera o efeito sobre as ações do vento da não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície ( $c_s$ ), levando em consideração também o efeito causado na estrutura pelas vibrações que ocorrem em razão da turbulência ( $c_d$ ). O procedimento de cálculo do coeficiente estrutural recomendado pela EN 1991.1.4 será descrito a seguir.

$$c_{s,c_d} = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (17)$$

Sendo:

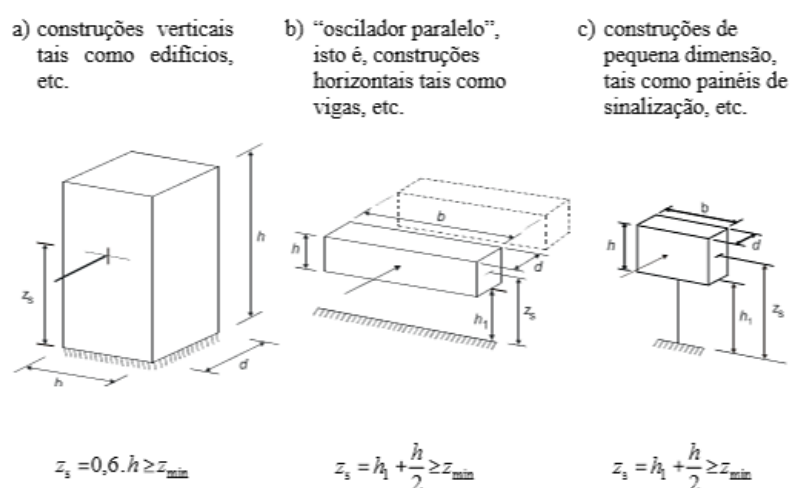
$k_p$ : fator de pico, definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta, definido pela equação 18;

$I_v$ : intensidade de turbulência, definida pela equação 11;

$B^2$ : coeficiente de resposta quase-estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da construção, definido pela equação 20;

$R^2$ : coeficiente de resposta em ressonância, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração, definido pela equação 23;

$z_s$ : altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural, conforme figura 23.



**Figura 23: Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo.**

**Fonte: EN 1991.1.4. Figura 6.1.**

É importante ressaltar que a equação 17 só pode ser empregada por se tratar de uma construção equivalente a uma das formas gerais apresentadas na figura acima Figura 23 e devido ao fato de só serem significativas as vibrações na direção do vento através do modo fundamental (primeiro modo de vibração), sendo que a configuração do modo tem sempre o mesmo sinal. Neste caso, a contribuição de resposta do segundo modo ou de modos superiores é desprezível.

O coeficiente de pico ( $k_p$ ) é definido pela equação 18.

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)}} \geq 3,0 \quad (18)$$

Sendo:

$v$ : frequência de passagens ascendentes, definida pela equação 19;

$T$ : tempo de integração da velocidade média do vento, como recomendado pela EN 1991.1.4.,  $T=600s$ .

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz} \quad (19)$$

Sendo:

$n_{1,x}$ : frequência natural da estrutura paralela à atuação do vento e sendo o primeiro modo de vibração;

O coeficiente de resposta quase-estática ( $B^2$ ) é definido pela equação 20. A consideração do valor de  $B^2$  igual a 1 é a favor da segurança.

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}} \quad (20)$$

Sendo:

$b, h$ : a largura e altura, respectivamente, da estrutura em estudo;

$L(z_s)$ : Escala de comprimento de turbulência à altura de referência  $z_s$ .

A escala de comprimento de turbulência ( $L(z_s)$ ) é uma representação da rajada média de ventos naturais. Deste modo, considerando uma altura  $z$  inferior a 200 metros, esse parâmetro é definido a partir da equação 21.

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha \quad \text{para } z \geq z_{\min}$$

$$L(z) = L(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min} \quad (21)$$

Sendo:

$L_t$ : escala de comprimento de referência. Neste caso,  $L_t = 300\text{m}$ , como recomendado por norma;

$z_t$ : altura de referência. Neste caso,  $z_t = 200\text{m}$ , como recomendado por norma;

$z_{\min}$ : altura mínima adotada. Neste caso,  $z_{\min}$  é igual a 2 metros, conforme apresentado no Quadro 7, considerando um terreno de classificação II.

$$\alpha = 0,67 + 0,05\ln(z_0) \quad (22)$$

O parâmetro  $z_0$  está definido no quadro 7, sendo igual a 0,05, considerando um terreno de classificação II.

O coeficiente de resposta de ressonância ( $R^2$ ) é definido pela equação abaixo.

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) \quad (23)$$

Sendo:

$\delta$ : decréscimo logarítmico total do amortecimento, definido pela equação 26;

$S_L$ : função adimensional de densidade espectral de potência, definida pela equação 28;

$R_h$ ,  $R_b$ : funções de admissão aerodinâmicas, definidas pelas equações 30 e 31, respectivamente;

O decréscimo logarítmico total do amortecimento é obtido a partir da adição dos decréscimos logarítmicos do amortecimento estrutural ( $\delta_s$ ), aerodinâmico ( $\delta_a$ ) e em função da existência de dispositivos especiais ( $\delta_d$ ).

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (24)$$

O decréscimo logarítmico estrutural foi definido de acordo com o quadro 10, sendo este igual a 0,012, considerando a estrutura como uma chaminé de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e sem isolamento térmico exterior.

**Quadro 10: Valores aproximados para o decréscimo logarítmico estrutural do amortecimento no modo fundamental.**

Tipo de estrutura		Amortecimento estrutural, $\delta_s$
Edifícios de concreto armado		0,10
Edifícios de aço		0,05
Estruturas mistas concreto + aço		0,08
Torres e chaminés de concreto armado		0,03
Chaminés de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e sem isolamento térmico exterior		0,012
Chaminés de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e com isolamento térmico exterior		0,020
Chaminé de aço com um forro de conduta e com isolamento térmico exterior	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
Chaminé de aço com dois ou mais forros de conduta e com isolamento térmico exterior	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
Chaminé de aço com forro de conduta em alvenaria tijolo		0,070
Chaminé de aço com argamassa projetada no interior		0,030
Chaminés acopladas sem forro de conduta		0,015
Chaminé de aço espiada sem forro de conduta		0,04
Pontes de aço; Torres de aço reticuladas.	com ligações soldadas	0,02
	com ligações de parafusos de alta resistência	0,03
	com ligações de parafusos correntes	0,05
Pontes mistas		0,04
Pontes de concreto	pré-esforçadas, sem fissuração	0,04
	com fissuração	0,10
Pontes de madeira		0,06 - 0,12
Pontes de ligas de alumínio		0,02
Pontes de plástico reforçado com fibras de vidro		0,04 – 0,08
Cabos	de fios paralelos	0,006
	de cordões	0,020

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

O decréscimo logarítmico de amortecimento aerodinâmico é definido pela equação 25, considerando a deflexão modal ( $\phi(y,z)$ ) como constante.

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot \eta_1 \cdot m_e} \quad (25)$$

Sendo:

$c_f$ : coeficiente de força da seção transversal;

$\rho$ : massa volúmica do ar, a qual depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. O valor recomendado é de 1,25 kg/m<sup>3</sup>, conforme EN 1991.1.4;

$b$ : largura da estrutura, considerando a região de maior amplitude de resposta;

$v_m(z_s)$ : velocidade média a uma altura de referência  $z_s$ ;

$n_1$ : frequência do primeiro modo de vibração da estrutura;

$m_e$ : massa equivalente por unidade de comprimento do modo fundamental, definida pela equação 27.

A frequência do primeiro modo de vibração ( $n_1$ ) pode ser definida também definida pela seguinte equação, caso não seja modelada a estrutura para a obtenção de suas frequências vibratórias.

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{x_1}} \quad (26)$$

Sendo:

$g$ : aceleração da gravidade, sendo assim,  $g$  é igual a 9,81 [m/s<sup>2</sup>];

$x_1$ : deslocamento máximo, em metros, em decorrência do peso próprio da estrutura na direção de vibração.

Sendo  $l$  a altura da estrutura em estudo, a massa equivalente por unidade de comprimento do modo fundamental é dada por:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds} \quad (27)$$

A função adimensional de densidade espectral de potência é definida por:

$$S_L(z,n) = \frac{n \cdot S_v(z,n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 \cdot f_L(z,n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z,n))^{5/3}} \quad (28)$$

Sendo:

$n$ : frequência natural da estrutura, em Hz;

$S_v(z,n)$ : espectro de variância unilateral;

$f_L(z,n)$ : frequência adimensional, definida na equação 29.

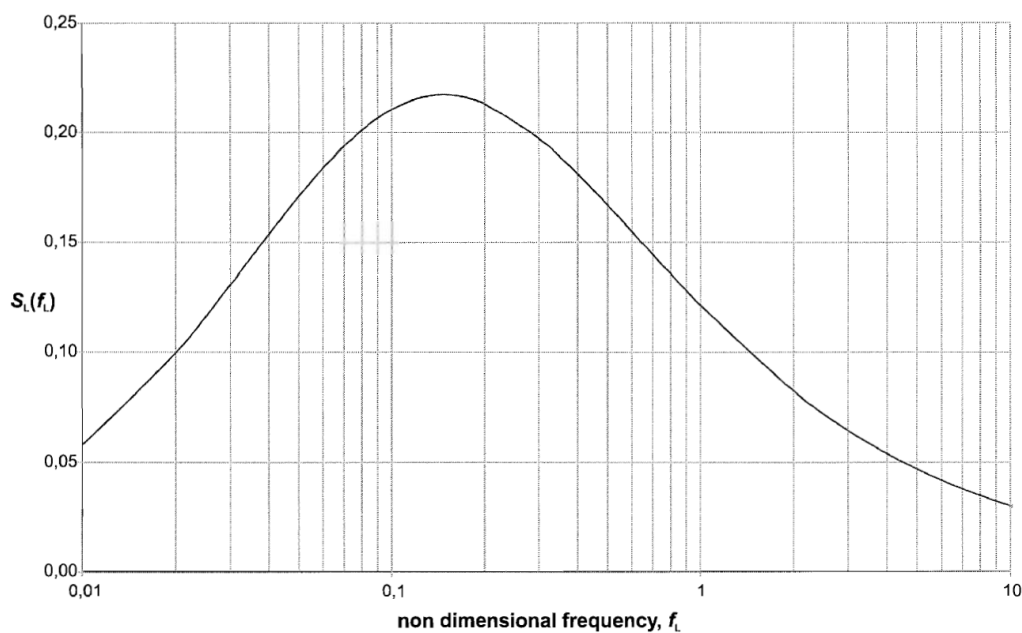
$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)} \quad (29)$$

Sendo:

$n$ : frequência natural da estrutura, em Hz;

$L(z)$ : escala de comprimento de turbulência.

$v_m(z)$ : velocidade média a uma altura  $z$ ;



**Figura 24: Função da densidade espectral de potência ( $S_L(f_L)$ ).**

**Fonte: EN 1991.1.4. Figura B.1.**

Com o objetivo de finalizar o cálculo do coeficiente de resposta de ressonância, calculam-se então as funções de admissão aerodinâmicas  $R_h$  e  $R_b$ .

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2}(1 - e^{-2\eta_h}); \quad R_h = 1 \text{ para } \eta_h = 0 \quad (30)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2}(1 - e^{-2\eta_b}); \quad R_b = 1 \text{ para } \eta_b = 0 \quad (31)$$

Com:

$$\eta_h = \frac{4,6h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (32)$$

$$\eta_b = \frac{4,6b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (33)$$

Sendo:

h: altura da estrutura;

L (z): escala de comprimento de turbulência;

$f_L(z,n)$ : frequência adimensional, definida na equação 29.

b: largura da estrutura;

### 3.5.7 Forças causadas pelo vento

Para determinação das forças que o vento exerce sobre um elemento construtivo será utilizada a equação 34.

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (34)$$

Sendo:

$c_s c_d$ : coeficiente estrutural, definido pela equação 17;

$c_f$ : coeficiente de força, definido pela equação 14;

$q_p$ : pressão dinâmica de pico, definida pela equação 10;

$A_{ref}$ : área de referência ( $A_{ref} = l \cdot b$ ), sendo l o comprimento estrutural considerado.

Neste caso, a velocidade a ser considerada na parcela da pressão dinâmica de pico será igual a  $v_{med}$  (item 3.3.3) e a parcela de turbulência  $(1+7 \cdot I_v(z))$  será retirada.

Sendo assim:

$$F_{w,med} = c_s c_d c_f \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{med}^2 \cdot A_{ref} \quad (35)$$

### 3.5.8 Fenômeno de desprendimento de vórtices

O entendimento do fenômeno de desprendimento de vórtices em suas diversas variações é de grande importância visto as aplicações práticas que isto permite e também dos severos danos que podem ser ocasionados caso tenha o seu negligenciamento. Por exemplo, a ponte de Tacoma Narrows entrou em colapso devido a ocorrência de desprendimento de vórtices. A combinação da aerodinâmica da seção da ponte juntamente com a força do vento produziram oscilações significativas, fazendo a estrutura não suportar os esforços nela exercidos. Outro exemplo é o arranha-céu Burj Khalifa onde sua forma foi estrategicamente pensada para atenuar a indução de forças de vórtices na estrutura (ANDERSSON, 2013).

De acordo com Ribeiro (2002), o fenômeno de desprendimento de vórtices ocorre quando há o escoamento de um fluido ao redor de um obstáculo, fazendo com que ocorram variações de pressões na superfície do “obstáculo”, resultando em esforços dinâmicos em forma de oscilações. No caso de estruturas esbeltas, como a torre metálica do presente estudo, o conhecimento do fenômeno é essencial para evitar vibrações indesejadas, impedindo que seja alcançada a frequência de ressonância, que resultaria na falha estrutural do elemento estudado, caso a frequência causada pelas ações externas se iguale as vibrações naturais da torre.

Segundo a EN 1991.1.4, o fenômeno ocorre quando há o desprendimento alternado do vórtice em ambos os lados da estrutura, fazendo com que surja uma carga flutuante perpendicular à direção do vento. Neste caso, quando a frequência do desprendimento de vórtices é igual a frequência natural da estrutura, há a indução de vibrações, neste momento a velocidade do vento é igual a velocidade crítica ( $v_{crit}$ ).

$$v_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{S_t} \quad (36)$$

Sendo:

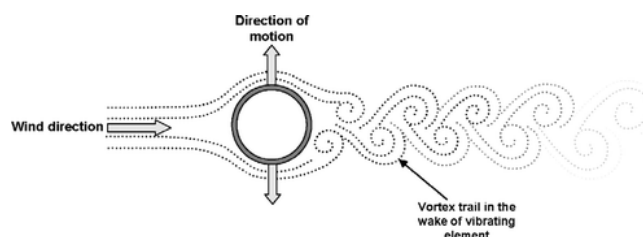
b: largura de referência da seção transversal na qual ocorre o desprendimento de vórtice com deflexão modal máxima da estrutura. Considerando que para a análise a estrutura em estudo será considerada como seção transversal circular, a largura de referência é igual ao diâmetro externo da circunferência;

$n_{i,y}$ : frequência natural do modo de flexão  $i$  de vibração da na direção transversal a força atuante do vento, obtida através da do ensaio de vibrações;

$S_t$ : Número de Strouhal, obtido através da figura 25. Considerando uma seção circular,  $S_t$  é igual a 0,18.

O desprendimento de vórtice não precisa ser analisado quando a velocidade crítica é menor do que 1,25 vezes a velocidade média do vento ( $v_m$ ). Neste caso de estudo, tal condições só será satisfeita para modos de vibração elevados, que serão desprezados de análise uma vez que contribuem de forma pouco significativa aos esforços à estrutura.

Admitindo que o desprendimento de vórtice ocorrerá sempre na região da estrutura com maior deslocamento modal e considerando o primeiro modo de vibração, o fenômeno ocorreria na parte superior da torre em estudo. No entanto, é importante ressaltar que o fenômeno de desprendimento de vórtices ocorre devido a interrupção de um fluxo de ar contínuo em razão da existência de um obstáculo, conforme apresentado na figura abaixo.


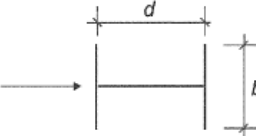
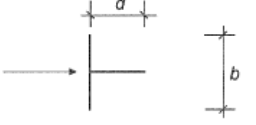
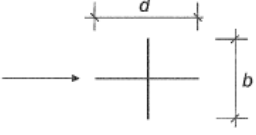
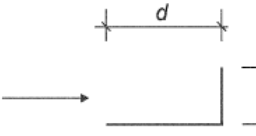


**Figura 25: Desprendimento de vórtice em um objeto simétrico.**

**Fonte: Rice *et. al.* (2007).**

Desta forma, quando o aerogerador se encontra em funcionamento, há um distúrbio do fluxo do ar antes do mesmo atingir a torre de suporte, fazendo com que as interações torre/vento sejam muito mais complexas, necessitando uma modelagem do fluido para um completo entendimento.

No entanto, uma vez que os Eurocódigos não contemplam este tipo de situações, o efeito de desprendimento de vórtices vai ser tido em conta conforme consta nos mesmos, ou seja, como uma torre isolada, sem nenhum fator de perturbação do escoamento do ar em seu redor.

Seção transversal	$S_t$
 <p>para todos os números de Reynolds (Re)</p>	0,18
 <p>interpolação linear</p>	$d/b = 1$ 0,11 $d/b = 1,5$ 0,10 $d/b = 2$ 0,14
 <p>interpolação linear</p>	$d/b = 1$ 0,13 $d/b = 2$ 0,08
 <p>interpolação linear</p>	$d/b = 1$ 0,16 $d/b = 2$ 0,12
 <p>interpolação linear</p>	$d/b = 1,3$ 0,11 $d/b = 2,0$ 0,07
NOTA: Extrapolações para o número de Strouhal como função de $d/b$ não são permitidas	

**Figura 26: Números de Strouhal para diferentes seções transversais.**

**Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.**

Por fim, os efeitos causados pelas vibrações devido ao desprendimento de vórtice podem ser estimados a partir do efeito da força de inércia por unidade de comprimento ( $F_w$  (s)) atuando na região  $s$  da estrutura de forma perpendicular à direção do vento, como demonstra a equação a seguir.

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \quad (37)$$

Sendo:

$m(s)$ : massa oscilante da estrutura por unidade de comprimento [kg/m];

$n_{i,y}$ : frequência natural da estrutura;

$\phi_{i,y}(s)$ : fator de forma da estrutura, admitindo  $\phi_{i,y}(s) = 1$  no ponto de deslocamento máximo;

$y_{F,max}$ : deslocamento máximo no ponto  $\phi_{i,y}(s) = 1$ , ao longo do tempo.

A norma EN 1991.1.4 discute a utilização de dois métodos de cálculo para o deslocamento máximo  $y_{F,max}$ , O primeiro pode ser utilizado para diferentes tipos de estruturas e fatores de forma, devendo ser utilizado para regiões com condições climáticas normais e será o método abordado neste estudo.

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{S_t^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \quad (38)$$

Sendo:

$S_t$ : número de Strouhal,  $S_t = 0,18$ ;

$S_c$ : número de Scruton;

$K$ : fator de forma modal;

$K_w$ : fator de comprimento de correlação efetivo;

$c_{lat}$ : coeficiente de força lateral.

Neste contexto, o número de Struton ( $S_c$ ) é definido pela equação a seguir.

$$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2} \quad (39)$$

Sendo:

$\delta_s$ : amortecimento estrutural expresso pelo decréscimo logarítmico, apresentado no Quadro 10Quadro 10;

$m_{i,e}$ : massa equivalente por unidade de comprimento para o modo de vibração  $i$ , definida pela equação 27;

$\rho$ : densidade do ar em condições de desprendimento de vórtice,  $\rho = 1,25$  [kg/m<sup>3</sup>], valor recomendado pela EN 1991.1.4;

$b$ : largura de referência da seção transversal para qual ocorre o desprendimento de vórtice. No caso, será considerado o diâmetro superior da estrutura, 35 cm.

O fator de forma modal ( $K$ ) é obtido através da equação 42.

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\phi_{i,y}(s)| ds}{4 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^m \phi_{i,y}^2(s) ds} \quad (40)$$

Sendo:

$\phi_{i,y}(s)$ : fator de forma da estrutura, admitindo  $\phi_{i,y}(s) = 1$  no ponto de deslocamento máximo;

$m$ : número de antinós da estrutura com modo de vibração  $\phi_{i,y}$ ;

$l$ : comprimento da estrutura em dois nós.

O fator de comprimento de correlação efetivo ( $K_w$ ) é obtido através da equação a seguir.

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} |\phi_{i,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\phi_{i,y}(s)| ds} \leq 0,6 \quad (41)$$

Sendo:

$\phi_{i,y}(s)$ : fator de forma da estrutura, admitindo  $\phi_{i,y}(s) = 1$  no ponto de deslocamento máximo;

$L_j$ : comprimento de correlação, obtido no quadro 11;

$l_j$ : comprimento da estrutura entre dois nós. Para estruturas em estudo, sendo engastada-extremidade livre,  $l_j$  será igual a altura da estrutura.

$n$ : número de regiões em que os desprendimentos de vórtice acontecem ao mesmo tempo;

$m$ : número de antinós da estrutura com modo de vibração  $\phi_{i,y}$ , apresentado na figura 27;

$s$ : coordenada da região estudada.

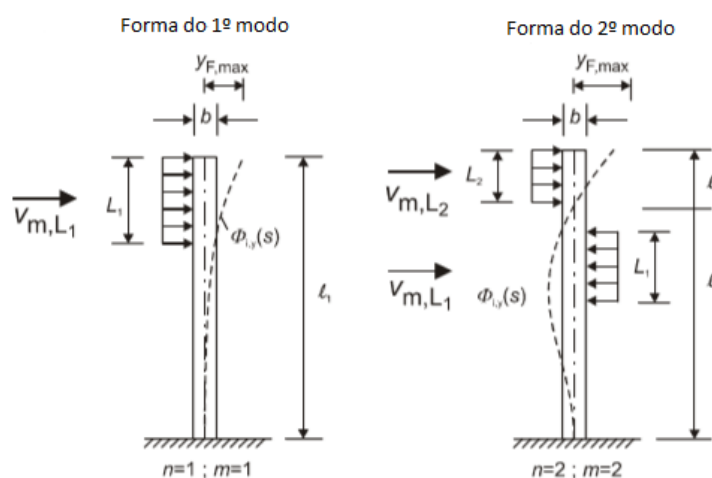


Figura 27: Número de antinós em função do comprimento de correlação  $L_j$ .

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

Quadro 11: Comprimento de correlação efetivo em função da amplitude de vibração.

$y_F(s_j) / b$	$L_j / b$
< 0,1	6
0,1 - 0,6	$4,8 + 12 \cdot \frac{y_F(s_j)}{b}$
> 0,6	12

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

O cálculo do coeficiente de força lateral depende da velocidade crítica do vento ( $v_{crit,i}$ ), da velocidade média do vento ao centro do comprimento de correlação efetivo ( $v_{m,L_j}$ ) e do valor básico do coeficiente de força lateral ( $C_{lat,0}$ ), conforme apresentado no quadro a seguir.

**Quadro 12: Coeficiente de força lateral ( $c_{lat}$ ).**

Relação $v_{crit,i} / v_{m,Lj}$	$c_{lat}$
$\frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \leq 0,83$	$c_{lat} = c_{lat,0}$
$0,83 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} < 1,25$	$c_{lat} = \left( 3 - 2,4 \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \right) \cdot c_{lat,0}$
$1,25 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}}$	$c_{lat} = 0$

Fonte: Adaptado de EN 1991.1.4.

O valor básico do coeficiente de força lateral pode, então, ser obtido através da figura abaixo, que o relaciona com o número de Reynolds, anteriormente definido pela equação 15.

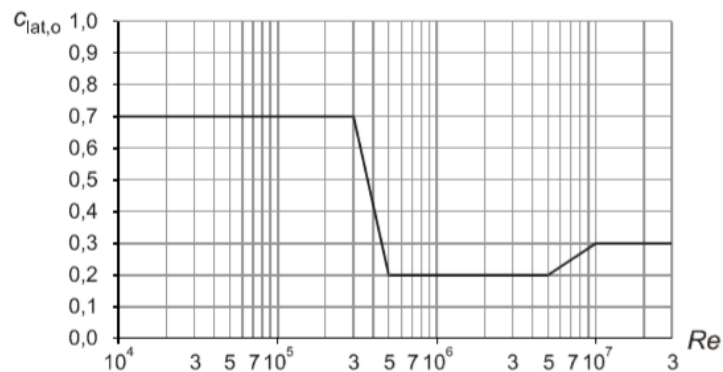


Figura 28: Valor básico do coeficiente de força lateral ( $c_{lat,0}$ ).

Fonte: EN 1991.1.4.

Por fim, o número de ciclos de carregamento ( $N$ ) causados pelas oscilações que ocorrem devido ao desprendimento de vórtices é dado pela equação seguinte. A norma EN 1991.1.4 recomenda que  $N \geq 10^4$ .

$$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \cdot \left( \frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left( - \left( \frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right) \quad (42)$$

Sendo:

T: tempo de vida, em segundos, que é igual a  $3,2 \times 10^7$  multiplicados pelo tempo de vida previsto, em anos;

$n_y$ : frequência natural do modo de vibração transversal à ação do vento, obtida através do ensaio de vibrações;

$\varepsilon_0$ : fator de largura de banda que descreve a banda de velocidades do vento com indução de vibrações devido aos desprendimentos de vórtice,  $\varepsilon_0 = 0,3$ , como recomendado pela EN 1991.1.4;

$v_{crit}$ : velocidade crítica do vento;

$v_0$ : valor modal segundo a distribuição probabilística de Weibull, utilizada para a velocidade do vento, multiplicado por  $\sqrt{2}$ . Neste caso, será adotado como  $v_0$  o valor de 20% do valor característico da velocidade média do vento à altura em que ocorrem os fenômenos de desprendimento de vórtice.

## 4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

### 4.1 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

A seguir serão apresentados os cálculos e resultados obtidos com a utilização das equações e seguindo os procedimentos de cálculo descritos no item 3.5 deste estudo. Os cálculos foram realizados com o programa Excel e serão apresentados em quadros para uma melhor visualização e entendimento, assim como a referência de tabelas e quadros utilizados.

#### 4.1.1 Modelação das ações do vento

**Quadro 13: Cálculo do valor de referência da velocidade do vento ( $v_b$ ).**

Parâmetro	Valor	Unidade	Equação	Referência	Valor
$C_{dir}$	1,0	-	$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0}$	Equação 1	30 [m/s]
$C_{season}$	1,0	-			
$V_{b,0}$	30	[m/s]			

Fonte: O autor.

#### 4.1.2 Vibrações na direção do escoamento

**Quadro 14: Cálculo da velocidade média do vento ( $v_m$ ).**

Parâmetro	Equação	Referência	Valor	Unidade
$h$	-	Figura 11	20,00	m
$z_0$	-	Quadro 7	0,05	m
$z_{0,II}$	-	Quadro 7	0,05	m
$z$	$z = 0,6 \cdot h$	Figura 23	12,00	m
$c_0(z)$	-	EN 1991.1.4 (2010)	1,00	-
$V_b$	-	Quadro 5	30,00	m/s
$k_r$	$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$	Equação 5	0,19	-
$c_r(z)$	$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$	Equação 4	1,04	-
$v_m(z)$	$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$	Equação 3	31,24	m/s

Fonte: O autor.

## 4.1.3 Coeficiente de exposição

Quadro 15: Cálculo do coeficiente de exposição ( $c_e$ ).

Parâmetro	Equação	Referência	Valor	Unidade
$\rho$	-	EN 1991.1.4 (2010)	1,25	kg/m <sup>3</sup>
$v_b$	-	Quadro 5	30,00	m/s
$k_r$	-	Quadro 14	0,19	-
$k_1$	-	EN 1991.1.4 (2010)	1,00	-
$v_m(z)$	-	Quadro 14	31,24	m/s
$q_b$	$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$	Equação 13	562,50	Pa
$\sigma_v$	$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_1$	Equação 12	5,70	m/s
$l_v(z)$	$l_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)}$	Equação 11	0,182	-
$q_p(z)$	$q_p(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$	Equação 10	1.388,99	Pa
$c_e(z)$	$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$	Equação 9	2,47	-

Fonte: O autor.

## 4.1.4 Coeficiente de força

Quadro 16: Cálculo do coeficiente de força ( $c_f$ ).

Parâmetro	Equação	Referência	Valor	Unidade
$\lambda$	-	Quadro 9 (N° 4)	70	-
$\varphi$	-	-	1,0	-
$\psi_\lambda$	-	Figura 22	0,92	-
$k$	-	Quadro 8	0,0002	m
$b$	-	Figura 11	0,750	m
$k/b$	-	-	0,00027	
$\rho$	-	EN 1991.1.4 (2010)	1,25	kg/m <sup>3</sup>
$q_p$	-	Quadro 15	1.388,986	Pa
$v$	-	EN 1991.1.4 (2010)	$15 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
...	...	...	...	...

...	...	...	...	...
$v(z_e)$	$v(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}}$	Equação 16	47,142	m/s
Re	$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu}$	Equação 15	$2,362 \times 10^6$	-
$c_{f,0}$	$c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k / b)}{1 + 0,4 \cdot \log(Re / 10^6)}$	Figura 20	1,079	-
$c_f$	$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$	<b>Equação 14</b>	<b>0,993</b>	-

Fonte: O autor.

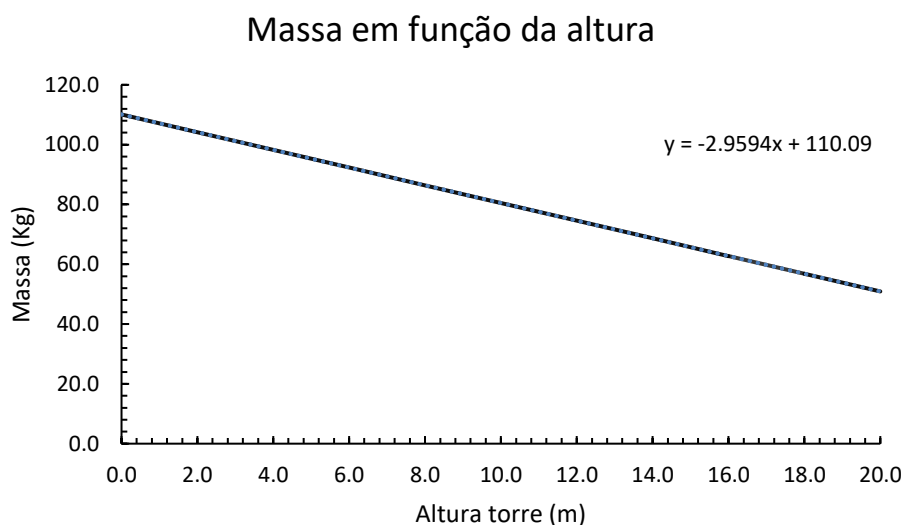
#### 4.1.5 Coeficiente estrutural

Para o cálculo do coeficiente estrutural, foi necessário determinar uma equação para a massa da estrutura em função da altura (m(s)). Os cálculos foram realizados e a equação foi obtida com auxílio do programa *Excel*. Os resultados serão apresentados no quadro abaixo e no gráfico a seguir. Para o cálculo da massa, foi considerado uma relação de 7850 Kg/m<sup>2</sup> para o aço utilizado na confecção da torre. As áreas dos polígonos internos e externos foram obtidas com auxílio do *software* AutoCad.

**Quadro 17: Cálculo das massas equivalentes por elemento.**

Altura (m)	Área externa (m <sup>2</sup> )	Área interna (m <sup>2</sup> )	Massa (Kg)
0.00	0.442	0.428	110.089
2.00	0.396	0.383	104.170
4.00	0.353	0.340	98.251
6.00	0.312	0.300	92.333
8.00	0.273	0.262	86.414
10.00	0.238	0.227	80.495
12.00	0.204	0.195	74.576
14.00	0.173	0.165	68.658
16.00	0.145	0.137	62.739
18.00	0.119	0.112	56.820
20.00	0.096	0.090	50.901

Fonte: O autor.



**Figura 29 - Gráfico massa em função da altura**

Fonte: O autor.

Após feito isso, é possível prosseguir com o cálculo do coeficiente estrutural, conforme apresentado no quadro abaixo. Além disso, foi necessário o cálculo da equação da função modal ( $\phi_1(s)$ ) da estrutura, conforme visto no quadro 4 e figura 17.

**Quadro 18 - Cálculo coeficiente resposta quase-estática ( $B^2$ )**

Parâmetro	Equação	Referência	Valor	Unidade
b	-	Figura 11	0,75	m
h	-	Figura 11	20,00	m
$\alpha$	$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$	Equação 22	0,520	
L(z)	$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha$	Equação 21	65,339	m
$B^2$	$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}}$	<b>Equação 20</b>	<b>0,712</b>	-

Fonte: O autor.

Quadro 19: Cálculo do coeficiente estrutural ( $c_{scd}$ ).

Parâmetro	Equação	Referência	Valor	Unidade
$z_0$	-	Quadro 7	0,05	m
$Z$	$Z = 0,6 \cdot h$	Figura 23	12,00	m
$z_t$	-	EN 1991.1.4 (2010)	200	m
$L_t$	-	EN 1991.1.4 (2010)	300	m
$n$	-	Quadro 3 – modo 1	2,04	Hz
$v_m(z)$	-	Quadro 14	31,24	m/s
$B$	-	Figura 11	0,75	m
$H$	-	Figura 11	20	m
$c_f$	-	Quadro 16	0,993	-
$P$	-	EN 1991.1.4 (2010)	1,25	kg/m <sup>3</sup>
$\delta_d$	-	-	0	-
$\delta_s$	-	Quadro 10	0,012	-
$T$	-	EN 1991.1.4 (2010)	600	S
$l_v(z_s)$	-	Quadro 15	0,1824	-
$m(s)$	$m(s) = \begin{cases} -2.9594.s + 110.09, & 0 \leq s \leq 20 \\ 75, & s > 20 \end{cases}$	Figura 29	-	Kg
$\phi_l(s)$	$\phi_l(s) = -2E-06s^4 + 3E-05s^3 + 0.0027s^2$	Figura 17	-	-
$\alpha$	$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$	Equação 22	0,520	-
$L(z)$	$L(z) = L_t \cdot \left( \frac{z}{z_t} \right)^\alpha$	Equação 21	69,422	m
$f_L(z,n)$	$f_L(z,n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)}$	Equação 29	4,533	-
$\eta_b$	$\eta_b = \frac{4,6b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x})$	Equação 32	0,225	-
$\eta_h$	$\eta_h = \frac{4,6h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x})$	Equação 33	6,001	-
...	...	...	...	...

...	...	...	...	...
R <sub>b</sub>	$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2}(1 - e^{-2\eta_b})$	Equação 31	0,865	-
R <sub>h</sub>	$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2}(1 - e^{-2\eta_h})$	Equação 30	0,153	-
S <sub>L</sub> (z,n)	$S_L(z,n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z,n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z,n))^{5/3}}$	Equação 28	0,050	-
m <sub>e</sub>	$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds}$ sendo 0 ≤ l ≤ 20m	Equação 27	72.5184	kg/m
δ <sub>a</sub>	$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$	Equação 25	0,098	-
δ	$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$	Equação 24	0,110	-
R <sup>2</sup>	$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$	Equação 23	0,295	-
B <sup>2</sup>	$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}}$	Equação 20	0,703	-
N	$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}$	Equação 19	1,095	Hz
k <sub>p</sub>	$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \geq 3,0$	Equação 18	3,771	-
c <sub>s</sub> c <sub>d</sub>	$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$	Equação 17	1,04	-

Fonte: O autor.

#### 4.1.6 Forças causadas pelo vento

Após serem calculados os coeficientes estrutural, de força e de exposição, assim como os valores de referência para velocidade média do vento, é possível determinar as forças causadas pelo vento na estrutura, sendo que as mesmas dependem da altura e da área projetada das faces da torre. No presente estudo,

preferiu-se manter as pressões encontradas, sem aplicá-las na superfície projetada da torre.

Foi feito uma análise da força do vento em relação a pressão que a mesma faz perante a superfície da torre, uma vez que foi retirado a parcela da área da equação. A torre foi dividida em 10 elementos de 2 metros de altura, desta forma a pressão analisada abrange uma faixa de 2 metros. Para exemplificar, no ponto a dois metros de altura, a pressão será considerada uniforme no ponto médio da área, portanto, desde o ponto a 1 metro até 3 metros de altura. Por este motivo foi considerado a pressão a 0.5 metros de altura para abranger a força presente na base.

Foram calculados então, os valores correspondentes à ação do vento, em  $N/m^2$ , considerando as alturas de referência apresentadas. um coeficiente estrutural de 1,04 ( $c_{sd}$ ) e um coeficiente de força igual a 0,992 ( $c_f$ ). Os valores para ação do vento serão, então, apresentados no quadro abaixo.

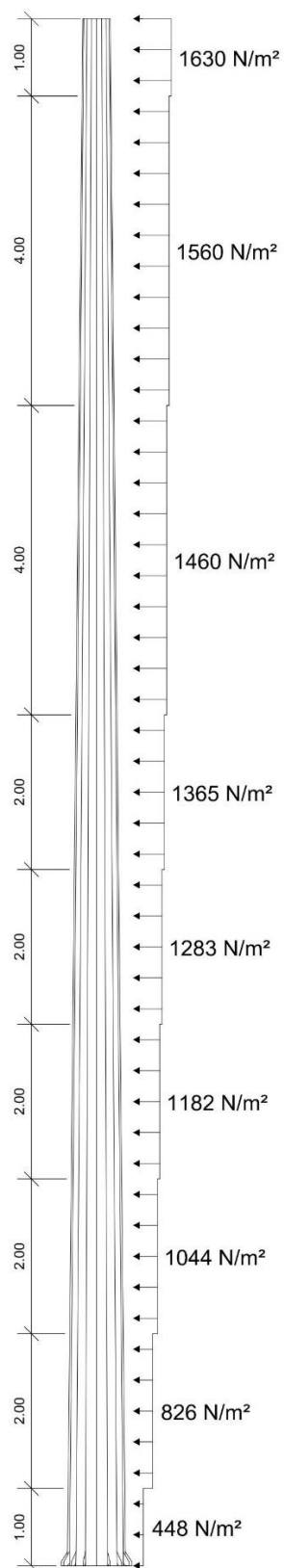
Uma vez que o coeficiente de pressão de dinâmica de pico ( $q_p$ ), a intensidade de turbulência do vento ( $I_v$ ), o coeficiente de rugosidade ( $c_r$ ) e a velocidade média do vento ( $v_m$ ) possuem uma interrelação com a altura, foram analisados os trechos da torre, levando em consideração as alturas anteriormente citadas, como pode ser visto no quadro abaixo.

**Quadro 20: Forças causadas pelo vento.**

altura (m)	altitude abrangida (m)	$C_r$	$v_m$	$I_v$	$q_p$	$F_w (N/m^2)$
0.5	0 a 1	0.44	13.12	0.43	434.96	448.74
2	1 a 3	0.70	21.03	0.27	800.68	826.04
4	3 a 5	0.83	24.98	0.23	1012.80	1044.89
6	5 a 7	0.91	27.29	0.21	1145.93	1182.24
8	7 a 9	0.96	28.93	0.20	1244.44	1283.86
10	9 a 11	1.01	30.20	0.19	1323.16	1365.08
12	11 a 13	1.04	31.24	0.18	1388.99	1432.99
14	13 a 15	1.07	32.12	0.18	1445.69	1491.49
16	15 a 17	1.10	32.88	0.17	1495.59	1542.97
18	17 a 19	1.12	33.55	0.17	1540.21	1589.00
20	19 a 20	1.14	34.15	0.17	1580.60	1630.67

Fonte: O autor.

Desta forma, como pode ser visto na imagem abaixo, está a disposição das forças por unidade de área ao longo do comprimento da torre.



**Figura 30 - Disposição força torre**  
Fonte: o Autor.

#### 4.1.7 Fator de resposta de rajada

O fator de resposta de rajada (G) em função da altura z do vento foi calculado a partir da equação 8, sendo o coeficiente estrutural  $c_{scd}$  igual a 1,04 e o coeficiente de exposição variando com a altura z. Os valores serão apresentados no Quadro 21.

**Quadro 21: Fator de resposta de rajada.**

altura (m)	altitude abrangida (m)	$q_p$	$c_e$	G
0.5	0 a 1	434.96	0.773	0.315
2	1 a 3	800.68	1.423	1.421
4	3 a 5	1012.80	1.801	2.063
6	5 a 7	1145.93	2.037	2.465
8	7 a 9	1244.44	2.212	2.763
10	9 a 11	1323.16	2.352	3.001
12	11 a 13	1388.99	2.469	3.200
14	13 a 15	1445.69	2.570	3.372
16	15 a 17	1495.59	2.659	3.523
18	17 a 19	1540.21	2.738	3.658
20	19 a 20	1580.60	2.810	3.780

Fonte: O autor.

#### 4.1.8 Fenômeno de desprendimento de vórtices

O desprendimento de vórtices ocorre quando há vibrações em direção transversal ao escoamento do vento, ou seja, nesta seção será analisado o segundo modo de vibração. Contudo, devido a simplificação do modelo e devido também a simetria da peça, as vibrações tanto paralelo quando transversalmente a estrutura possuem o mesmo valor. Porém, agora, quando as relações incluem valores da dimensão da base, por se tratar de desprendimento de vórtices com vibração no segundo modo, estes se encontram na extremidade da torre, logo, será considerado  $b=35$  cm.

Para evitar o processo iterativo vai ser assumido o pior caso possível, quando  $\gamma F(s_1)b > 0.6$ , ou seja, quando o comprimento de correlação  $L_j$  é o maior possível, levando aos maiores esforços possíveis na estrutura. Desta forma, conforme quadro 11,  $L_i/b = 12$ , portanto,  $L_i = 12 \cdot b$

Quadro 22: Fenômeno de desprendimento de vórtices.

Parâmetro	Equação	Referência	Valor	Unid.
$\varepsilon_0$	-	EN 1991.1.4 (2010)	0,3	-
T	-	EN 1991.1.4 (2010)	$8 \times 10^8$	m/s
$\rho$	-	EN 1991.1.4 (2010)	1,25	kg/m <sup>2</sup>
$\delta s$	-	Quadro 10	0,012	-
$S_t$	-	Figura 26	0,18	-
$n_{2,y}$	-	Quadro 3 – modo 2	2,04	Hz
b	-	Figura 11	0,35	m
$C_{lat,0}$	-	Figura 28	0,7	-
$l_i$	-	Figura 11	20	m
$L_i$	$L_i = 0,35 \cdot 12$	Quadro 11	4,20	m
$V_{crit,2}$	$V_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{S_t}$	Equação 36	4.005	m/s
Re	$Re = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{\nu}$	Equação 15	$8,471 \times 10^4$	-
m (s)	$m(s) = -2E-06s^4 + 3E-05s^3 + 0.0027s^2$	Figura 29	-	kg
$\Phi_{2,y}$ (s)	$\Phi_{2,y}(s) = -2E-06s^4 + 3E-05s^3 + 0.0027s^2$	Figura 17	-	-
$v_0$	$v_0 = 0,2 \cdot v_m(20,0)$	EN 1991.1.4 (2010)	6,83	m/s
$m_{2,e}$	$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds}$ sendo $0 \leq l \leq 20m$	Equação 27	72.518	kg/m
N	$N = 2 \cdot T \cdot n_y \cdot \varepsilon_0 \cdot \left( \frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \cdot \exp \left( - \left( \frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right)$	Equação 42	6.956.500. 738	
$C_{lat}$	$C_{lat} = C_{lat,0}$	Quadro 12	0,7	-
...	...	...	...	...

...	...	...	...	...
$K_w$	$K_w = \frac{\sum_{j=1}^1 \int_{15.8}^{20}  \phi_{2,y}(s)  ds}{\sum_{j=1}^m \int_0^{20}  \phi_{2,y}(s)  ds} \leq 0,6$	Equação 41	0,491	-
$K$	$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{ij}  \phi_{i,y}(s)  ds}{4 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^m \phi_{i,y}^2(s) ds}$	Equação 40	0,026	-
$S_c$	$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$	Equação 39	22,622	-
$y_{F,max}$	$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{S_t^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat}$	Equação 38	0,003	m
$F_w(s)$	$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{2,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max}$	Equação 37	-	N/m

Fonte: O autor.

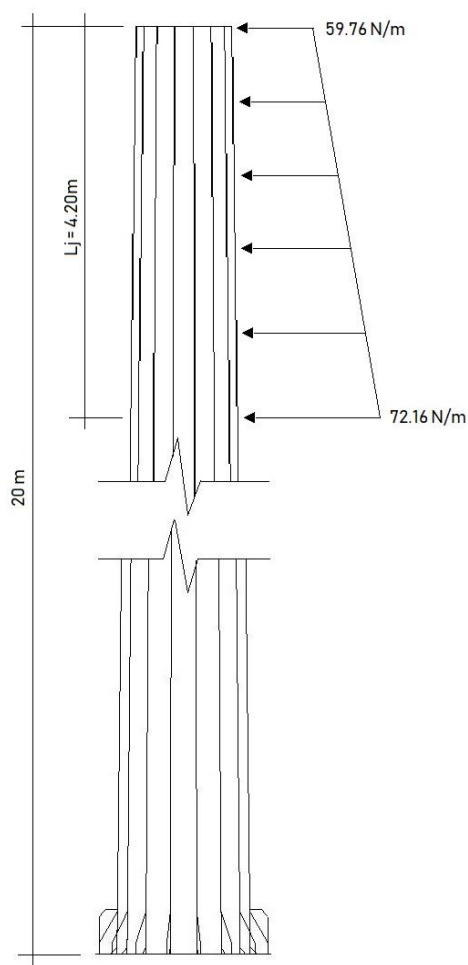
Assim, os valores para ações devido ao fenômeno do desprendimento de vórtice são apresentados no Quadro 23 em função da altura  $s$  considerada.

**Quadro 23: Ações devido ao fenômeno de desprendimento de vórtice.**

Altura (m)	m(s) (kg)	$\Phi_{2,y}$ (s)	$F_w$ (N/m)
15.8	64.14	0.668	59.76
20.0	51.71	1.000	72.16

Fonte: O autor.

Desta forma, obteve-se os valores da força por unidade de comprimento devido ao desprendimento de vórtices. O posicionamento desta forma leva em consideração o comprimento de correlação ( $L_j$ ) que, no estudo em questão, obteve-se por:  $L_j = 12 \cdot b = 4.20$  metros, tomando como referência a extremidade superior. Assim, as forças lineares serão impostas na estrutura da torre da cota 15.80 metros à 20 metros, como pode ser visto na figura a seguir.



**Figura 31 - Disposição das forças desprendimento de vórtices**  
**Fonte: O autor.**

Após a obtenção dos valores das ações, tanto para o desprendimento de vórtices quanto para as ações do vento na direção do escoamento, é possível aplicá-los a um modelo numérico para posterior análise quanto ao dimensionamento dinâmico da estrutura bem como análises à fadiga.

## 5 CONCLUSÃO

Após a realização de todos os procedimentos de cálculo foi possível obter a quantificação da ação do vento perante a estrutura de suporte do aerogerador. Estes valores se baseiam em uma simplificação, tornando carregamentos dinâmicos em ações estáticas.

Tais valores podem ser inseridos em programas para a análise de efeitos à fadiga, uma vez que são ações cíclicas e essas variações de tensões ao longo da vida da estrutura podem culminar ao efeito de fadiga. Para isso, a norma EN 1991.1.4 permite a quantificação do número de ciclos aproximado que a estrutura irá sofrer, conforme equação 42.

Desta forma, conforme quadro 20, é possível verificar as forças que incidem na torre, sendo essas na mesma direção do escoamento do vento. Estão representadas com abrangência de área, logo sua unidade é Newton por metro ao quadrado.

Por fim, conforme quadro 23, é possível verificar as forças causadas pelo desprendimento de vórtices que o escoamento de vento causa à estrutura. Desta forma, estas forças são perpendiculares ao escoamento. Estas estão representadas com disposição linear de força, logo sua unidade é Newton por metro.

## 6 ESTUDOS FUTUROS

Os cálculos envolvendo estruturas metálicas de mastros é relativamente complexo e envolve a análise de diversos fatores ainda pouco estudados, como os fenômenos de fadiga e desprendimento de vórtices. Deste modo, a partir dos procedimentos de cálculos e metodologias apresentadas neste estudo, é possível dar seguimento aplicando as forças obtidas a um modelo mais complexo e detalhado utilizando um programa de elementos finitos para posterior análise dos pormenores. Neste contexto, seria interessante o desenvolvimento de estudos futuros quanto a:

- Estudo dos fenômenos de fadiga em modelos numéricos com maior grau de complexidade, aproximando-se do modelo real e utilizando menos fatores simplificadoros;
- Estudo mais aprofundado dos fenômenos de desprendimento de vórtices e como o mesmo é influenciado pela geometria dos aerogeradores, bem como a modelagem do fluído para analisar a interação vento-aerogerador-vento-torre;
- Estudo dos efeitos dos fenômenos de desprendimento de vórtices em torres com estrutura circular ou poligonal.
- Analisar o comportamento da torre de suporte de aerogeradores para diferentes tipos de estrutura, como por exemplo, torres em concreto armado, torres treliçadas.

## REFERÊNCIAS

- AMARANTE, O. A. C. D.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. D. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**: p. 44, 2001.
- ANDERSSON, M., & STOJKOVIC, A. Documentation for the wind power lab turbine - System overview. Lund, Sweden 2013.
- ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - APREN. **Produção**. Portugal, 2018. Disponível em: < <http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> >. Acessado em: 15 de dezembro de 2018.
- BARRADA, R.V. **Impactos socioambientais nas aplicações de energia eólica para geração de eletricidade**. 2014. 79 p. Curso de Pós-Graduação em Formas Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.
- CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Imprensa Universitária, ISBN 85-7485-039-X, p. 146, 2003.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001.
- CORREA, P. M. **Energia Eólica: Análise Teórica e sua Aplicação no Mundo**. Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 56, 2010.
- CRESESB. **Componentes de um Aerogerador**. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php> >. Acessado em: 5 de janeiro de 2019.
- CUSTÓDIO, R. D. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. ELETROBRAS. ISBN 978-85-87083-09-8. p. 280, 2007.
- DIAS, Luana D. **Estudo de caso: análise estática e dinâmica de uma torre eólica**. 2018. Dissertação – Mestrado em Engenharia da Construção. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2018.
- DYRBYE, C. and S.O. Hansen, **Wind Loads on Structures**. Wiley, Nova Jersey, 1997. Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 64, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC). **EN 61400-2** – Wind turbines part 2: Design requirements for small wind turbines , 2006.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC). **EN 61400-1** – Wind turbines part 1: Design requirements, 2005-08.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1990– Eurocodigo 0**: Bases para o projeto de estruturas, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1991.1.4 – Eurocodigo 1** - Ações em estruturas parte 1-4: Acções gerais - Acções do vento, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1993.1.9 – Eurocodigo 3** - Projeto de estruturas de aço parte 1-9: Fadiga, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1993.3.1 – Eurocode 3**: Towers, masts and chimneys – Towers and masts, 2009.

GROGG, K. **Harvesting the wind: The Physics of Wind Turbines**. Carleton College, Minnessota, EUA, 2005.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Key world energy statistics**. Paris, 2013. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>> Acessado em: 10 de dezembro de 2018.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology Roadmap Wind Energy**. Paris, 2013. Disponível em: < <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-wind-energy-2013>>. Acessado em: 10 de dezembro de 2018.

JACINTO, L. **Acções do vento: quantificações de acordo com o EC1**. Rio de Janeiro, 2015.

KOTO, S. M. **Fontes Renováveis para a Produção de Energia Elétrica no Contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Estudo de Caso de Duas Fontes - Eólica e Fotovoltaica**. (Especialização). Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético, Instituto de Eletrotécnica e Energia - Universidade de São Paulo. p. 60, 2009.)

MANWELL, J. F., MACGOWAN, J. G. & ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained – Theory, Design and Application**, 2ª edição. Wiley, Chichester (Reino Unido), 2009.

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com**

MARQUES, S. **Energias Fósseis versus Energias Renováveis: proposta de intervenção de Educação Ambiental no 1º Ciclo do Ensino Básico**. 2007. 241f. Dissertação Mestrado. Universidade do Minho, Braga (Portugal), 2007.

MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A. & PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia Eólica**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional – BEN**. Brasília, 2017.

PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos**. 2006. Disponível em: <[http://files.pet-quimica.webnode.com/200000109-5ab055bae2/Conceitos\\_Energias\\_renov%C3%A1veis.pdf](http://files.pet-quimica.webnode.com/200000109-5ab055bae2/Conceitos_Energias_renov%C3%A1veis.pdf)> Acesso em: 10 de novembro de 2018.

POLÍCIA, A. R. **Estudo do Efeito de Fadiga em Torres com Aerogeradores**. Dissertação Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

RISATTI, H. **Theory of Craft: Function and Aesthetic Expression**. University of North Carolina Press, Raleigh, USA, 2009.

ROHATGI, J. S., & NELSON, V. **Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power**. Alternative Energy Institute. Canyon, Texas, 1994.

ROSA, C. A. & TIAGO FILHO, G. L. **Série Energias Renováveis: Solar**. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, Ministério de Minas e Energia, Itajubá (MG), 2007.

SHARPLEY, N.. **How wind farm monitoring leads to maximum output**. Windpower Engineering & Development, 2014.

STANO JUNIOR, A. & TIAGO FILHO, G. L. **Série Energias Renováveis: Energias Renováveis**. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, Ministério de Minas e Energia, Itajubá (MG), 2007.

TAYLOR, Z. J. **Vortex shedding from elongated bluff bodies**. PhD Thesis. University of Western Ontario; 2011.

TEMPEL, J. V. **Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines**. PhD Thesis. Delft, Países Baixos, 2006.

VERGARA, R. F. **Análise Estrutural de Torres Anemométricas e de Sustentação de Turbinas Eólicas**. Mestrado. Engenharia Oceânica, Fundação Universidade do Rio Grande. p. 161, 2005.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C.. **Energia, Meio Ambiente e Economia: O Brasil no contexto mundial**. Quím. Nova, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009.

WANG, S.. **Impacts of wind energy on environment: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 49, p. 437-443, 2015.

WIND BASICS. Wind Power Engineering & Development Handbook , p. 91. 2014.