

MIDIÃ NAARA DE BRITO PAULA

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ROTOR DE AEROGERADOR DE EIXO
VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO DE
CARAÚBAS**

MIDIÃ NAARA DE BRITO PAULA

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ROTOR DE AEROGERADOR DE EIXO
VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO DE
CARAÚBAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semiárido –
UFERSA, Campus Caraúbas para obtenção do
título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Rafael Luz Espindola–
UFERSA

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P324d Paula, Midilé Naara da Brito.
Dimensionamento e análise da rotor de aerogerador de eixo vertical de pequeno porte para as características de vento de Caracás / Midilé Naara da Brito Paula. - 2016.
43 f. : il.

Orientador: Rafael Luz Espindola.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Mecânica, 2016.

1. energia eólica. 2. turbina de eixo vertical.
3. potencial eólico. I. Espindola, Rafael Luz , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SIBSI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MIDIÃ NAARA DE BRITO PAULA

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO DE CARAÚBAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRS, Campus Caraúbas para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

APROVADO EM: 31/05/2016

BANCA EXAMINADORA



Prof. Msc. Rafael Luz Espindola - UFRS
Presidente



Prof. Diego Paes de Andrade Peña- UFRS
Primeiro Membro



Prof. Msc. Diego David Silva Diniz- UFRS
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, saúde e disposição necessárias para conclusão desse trabalho. Pela presença que me enche de paz, e não permite que eu perca esperança.

Aos meus pais, Francisco de Assis Paula Junior e Maria de Lourdes Brito Paula, por terem me ensinado desde a infância os princípios e valores que me fizeram chegar onde estou. Pelos investimentos que fizeram para que eu tivesse uma boa educação.

A Silvano Filho, meu esposo, pelo companheirismo e paciência, que me fazem sorrir mesmo quando eu chego em casa atarefada.

A minha irmã, Monalisa que é a minha companheira de infância, minha amiga e me fez acreditar que eu conseguiria. E por me presentear com meus sobrinhos Iara e Inacio, que na sua inocência me transmitiram a tranquilidade e paz necessárias.

A todos os meus familiares e amigos, que torceram por minha vitória. Em especial à Liege, Yago e Muniz, e a aos que estiveram comigo em toda jornada acadêmica e conquistaram um lugar especial no meu coração: Jade, João Miller, Vanessa, Monaliza, Marcia, Thais, Rodrigo e Yolli. Sem as noites em claro com vocês eu não teria conseguido.

A todos os professores da UFERSA que contribuíram para a minha formação. Em especial ao meu orientador Rafael Espindola, a pessoa que mais me ajudou neste trabalho e possibilitou a realização do mesmo, com a sua experiência, inteligência e paciência. Obrigada pelas críticas, sugestões e disponibilidade.

RESUMO

O Brasil é líder mundial em geração de energia limpa e renovável. Aliado ao desenvolvimento da tecnologia de parques eólicos, que produzem energia em grande escala, surge outra aplicação a uma escala menor, a tecnologia eólica de pequena potência, isolados ou não. Esse trabalho objetiva utilizar uma metodologia simplificada baseada nos dados atualmente disponíveis, para dimensionar o rotor de um aerogerador de eixo vertical de pequeno porte, do tipo Savonius, adequado às características de vento de Caraúbas/RN. Estimou-se a velocidade de rajada da região onde a partir desta dimensionou-se o aerogerador, para suportar esses esforços e estimou-se a produção anual para o modelo proposto.

Palavras-chave: energia eólica, turbina de eixo vertical, potencial eólico.

ABSTRACT

Brazil is a world leader in generating clean and renewable energy. Coupled with the development of the technology of wind farms that produce energy on a large scale, there arises another application on a smaller scale, wind power technology small, isolated or not. This paper aims to use a simplified methodology based on currently available data, to scale vertical axis small wind turbine, the Savonius type, suitable to wind characteristics of Caraúbas/RN . If the estimated wind speed region where from this scaled up the turbine to support these efforts, it was estimated annual production for the proposed model.

Key Words: wind energy, vertical axis turbine, wind potential.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 - Primeiro moinho de vento utilizado para gerar eletricidade | 13 |
| Figura 2– Exemplos de turbinas eólicas quanto a forma construtiva | 14 |
| Figura 3– Turbina eólica Savonius | 15 |
| Figura 4– Turbina eólicas de eixo vertical do tipo Darrieus. | 16 |
| Figura 5– Centrais eólicas instaladas. | 17 |
| Figura 6 - Perfil vertical da velocidade do vento | 18 |
| Figura 7 - Fluxo de ar através de uma área transversal A | 20 |
| Figura 8– Forças aerodinâmicas em um aerogerador | 23 |
| Figura 9 – Mapa de isopletas da velocidade básica do vento | 25 |
| Figura 10– Potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte..... | 27 |
| Figura 11 - Distribuição de frequência de Weibull | 28 |
| Figura 12– Bombona plástica com capacidade para 200 litros..... | 29 |
| Figura 13– Vista superior de aerogerador Savonius..... | 30 |
| Figura 14 – Dimensões de rolamento..... | 31 |
| Figura 15– Forças e Momento atuantes no rolamento | 32 |
| Figura 16– Forças interna no rolamento e indicação do ângulo β..... | 32 |
| Figura 17– Trapézio usado para calcular o ângulo β..... | 33 |
| Figura 18– Fator de segurança estimado em relação ao diâmetro do eixo | 37 |
| Figura 19– Simulação do comportamento do eixo fixado em uma extremidade..... | 37 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 -Top 10 países com capacidade instalada no ano de 2015..... | 10 |
| Tabela 2 – Coeficiente de arrasto..... | 23 |
| Tabela 3– Parâmetros meteorológicos..... | 25 |
| Tabela 4 – Valores mínimos do fator estatístico, S_3 | 26 |
| Tabela 5 - Velocidade média anual e parâmetros de Weibull: fator de forma e escala..... | 27 |
| Tabela 6 – Resumo dos resultados obtidos..... | 36 |
| Tabela 7 – Consumo energético da UFERSA | 39 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 Justificativa | 11 |
| 1.2 Objetivo geral..... | 12 |
| 1.3 Objetivos específicos..... | 12 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO | 13 |
| 2.1. Energia Eólica | 13 |
| 2.2. Turbinas Eólicas..... | 14 |
| 2.3. Panorama de Energia Eólica no Brasil..... | 16 |
| 2.4. Características do Vento..... | 18 |
| 2.5. Forças Aerodinâmicas | 22 |
| 3 METODOLOGIA..... | 24 |
| 4 PROJETO E DIMENSIONAMENTO | 27 |
| 4.1 Determinação da Velocidade Média Anual do Vento e Parâmetros de Weibull..... | 27 |
| 4.2 Distribuição de frequência de Weibull..... | 28 |
| 4.3 Cálculo da Velocidade Característica do Vento..... | 29 |
| 4.4 Dimensionamento do Rotor | 29 |
| 4.5 Carregamentos aplicados ao rotor | 30 |
| 4.6 Dimensionamento de rolamento..... | 31 |
| 4.7 Dimensionamento do eixo de rotação | 33 |
| 4.8 Produção anual de energia..... | 38 |
| 4.9 Demanda energética anual | 38 |
| 5 CONCLUSÃO | 40 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 41 |

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global e a dependência que países têm em relação aos combustíveis fósseis para a geração de energia têm proporcionado um crescimento nos investimentos em fontes alternativas de energia, principalmente a eólica.

O Brasil é líder mundial quanto à geração de energia renovável. Até a década passada, a capacidade instalada de hidrelétricas era superior a 90%. Atualmente, a principal fonte de energia são as hidrelétricas que somam 61,427%, enquanto que a eólica representa 5,469%. O estado do Rio Grande do Norte possui cento e vinte e seis empreendimentos em operação, gerando 3.066.200 kW de potência. Destes empreendimentos, 82,95% são centrais eólicas, 17,01% termelétricas e 0,04% solar fotovoltaica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2016). Nesse caso o cenário difere do nacional, uma vez que a principal matriz energética é a eólica, o que evidencia o enorme potencial dessa região, e justifica os atuais investimentos de empresas produtoras na região.

A Tabela 1 refere-se à capacidade instalada de energia eólica apenas no ano de 2015. A China e os Estados Unidos estão significativamente em destaque, tendo instalado, respectivamente, 48,4% e 13,6% dos 63.013 MW instalados mundialmente nesse ano. Observa-se também que o Brasil foi o quarto, instalando 2.754 MW, o que representa 4,4%. Isso mostra que esse tipo de energia vem apresentando um aumento significativo no país.

Tabela 1 - Top 10 países com capacidade instalada no ano de 2015

| País | MW | % |
|----------------|---------------|---------------|
| China | 30.500 | 48,4 |
| Estados Unidos | 8.598 | 13,6 |
| Alemanha | 6.013 | 9,5 |
| Brasil | 2.754 | 4,4 |
| Índia | 2.623 | 4,2 |
| Canadá | 1.506 | 2,4 |
| Polônia | 1.266 | 2,0 |
| França | 1.073 | 1,7 |
| Reino Unido | 975 | 1,5 |
| Turquia | 956 | 1,5 |
| Resto do Mundo | 6.749 | 10,7 |
| Total | 63.013 | 100,0% |

Fonte: Adaptado de GWEC, 2013

Aliado ao desenvolvimento da tecnologia de parques eólicos, que produzem energia em grande escala, surge outra aplicação a uma escala menor, a tecnologia eólica de pequena potência, isolados ou não. Utilizado em centros urbanos, ou zonas rurais distantes que requerem longas linhas de transmissão, ela possui características próprias de produção, requer menor superfície para instalação, apresenta menor ruído, evita as perdas em transmissões,

surge como alternativa de redução de gastos com energia elétrica, diminui o tempo de retorno do investimento, entre outros.

Desde a antiguidade utiliza-se sistema eólico de pequeno porte para gerar energia. Com o avanço dessa tecnologia e competitividade de mercado, é possível adquirir esse tipo de equipamento com menores investimentos. Segundo o atlas eólico brasileiro, o Nordeste é uma região com grande potencial eólico. Assim, realizar análises de viabilidade de instalação em zonas urbanas é de fundamental importância para o auxílio da matriz energética e redução de custos através de sistema de compensação de energia elétrica, previsto na Resolução nº 482/2012.

Este trabalho trata-se do dimensionamento e simulação do desempenho de um aerogerador de eixo vertical de pequeno porte, utilizando como metodologia uma análise da potência convertida em função da velocidade do vento e do potencial eólico, aplicado à Universidade Federal Rural do Semi-Árido - Campus Caraúbas, cidade de pequeno porte, do Rio Grande do Norte, no interior do Nordeste.

1.1 Justificativa

A principal fonte de geração de energia elétrica do Brasil é proveniente de hidrelétricas. Com um clima instável, aquecimento global e crise hídrica que afeta o país, a busca pela diversificação da matriz energética é constante.

Considerando os reajustes constantes em relação à energia elétrica, e o potencial eólico da região de estudo, confirmada através de medidas precisas, a aplicabilidade de aerogerador de pequeno porte de eixo vertical é uma alternativa interessante para ser considerada. Tendo como base o estudo realizado para aplicabilidade em Caraúbas, comparando eixo horizontal e vertical, onde viu-se que o aerogerador de melhor rendimento para as condições do local seria um aerogerador de eixo vertical (PEREIRA JR, 2015).

Este trabalho pretende expor a utilização da energia cinética presente no vento, aproveitada desde os primórdios da humanidade, para gerar energia elétrica renovável e de menor impacto ambiental. A metodologia a ser apresentada poderá ser utilizada para aplicações em zonas rurais sem acesso à eletricidade, ou grandes centros urbanos que não possuem espaço suficiente para instalação de aerogeradores de grande porte.

1.2 Objetivo geral

Dimensionar um rotor de eixo vertical de pequeno porte para as condições de vento da UFERSA.

1.3 Objetivos específicos

- Compreender os princípios de funcionamento da energia eólica e particularidades aplicadas às instalações de pequena potência;
- Dimensionar o consumo energético da Universidade Federal Rural do Semi-Árido;
- Analisar e dimensionar cada componente do rotor de um aerogerador de eixo vertical, que se adeque as condições locais de vento;
- Utilizar uma metodologia simplificada baseada nos dados atualmente disponíveis, para estimativa do potencial eólico;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é feita uma revisão dos aspectos mais relevantes para a compreensão teórica desse trabalho.

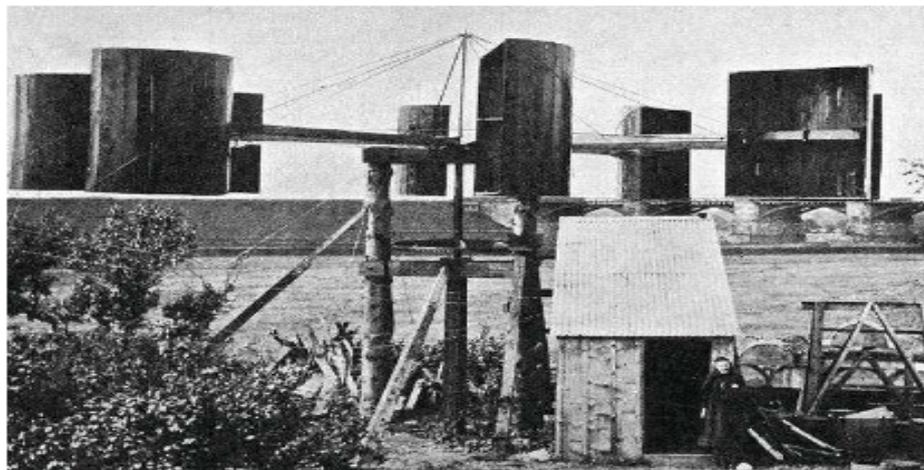
2.1. Energia Eólica

A energia eólica consiste no aproveitamento da energia cinética do vento. “Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade” (ANEEL, 2005).

Em relação ao período de surgimento de um dispositivo identificado como eólico, existem discordâncias entre diversos autores. Alguns acreditam que foram os egípcios os pioneiros a utilizarem o vento, por volta de 2800 a.C. Eles teriam adaptado velas aos seus barcos para auxiliar a força do remo dos escravos. Em seguida utilizaram do mesmo conceito de velas para auxiliar também a força provida por animais na moagem dos grãos e bombeamento de água.

O primeiro moinho de vento para gerar eletricidade foi construído em julho de 1887, na cidade escocesa de Glasgow, pelo engenheiro eletricitista e professor James Blyth, do Anderson’s College, atual universidade de Strathclyde (PINTO, 2013). A Figura 1 ilustra esta máquina que foi a primeira do mundo a fornecer eletricidade por energia eólica, e foi instalada na casa de campo do inventor.

Figura 1 - Primeiro moinho de vento utilizado para gerar eletricidade



Fonte: Adaptado de Pinto, 2013.

Durante séculos, utilizou-se a energia cinética do vento para geração de energia mecânica (moinhos de vento, barcos à vela), porém desde o século XIX começou-se a utilizá-lo também para produzir eletricidade.

Os países que lideravam esse desenvolvimento eólico eram os Estados Unidos e a Dinamarca. Os estudos voltavam-se, essencialmente, para utilização de turbina eólica de eixo horizontal (HAWT). A primeira turbina eólica de eixo vertical (VAWT), foi desenvolvida em 1888 pelo norte americano Charles Brush.

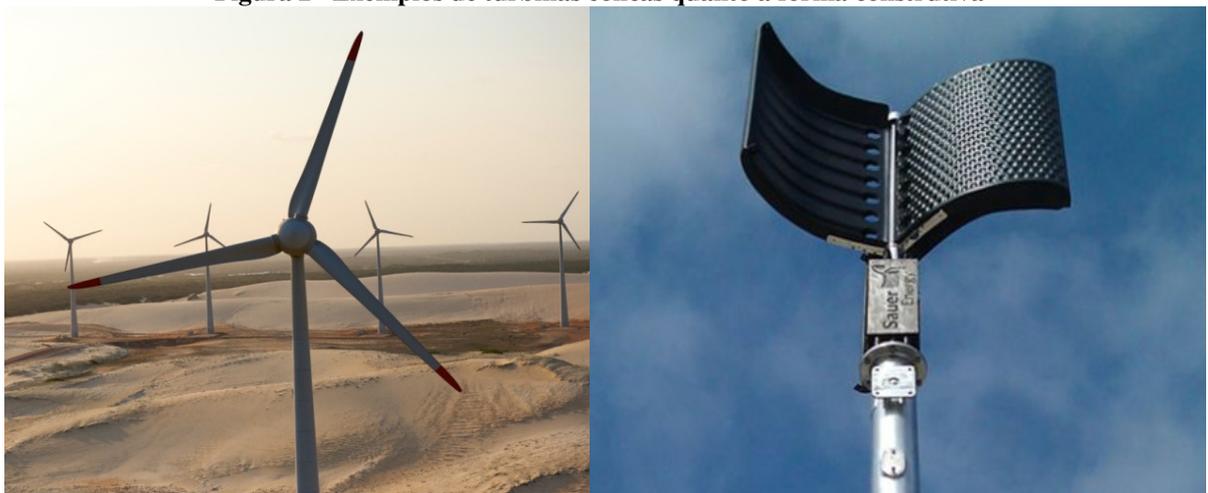
2.2. Turbinas Eólicas

Os aerogeradores podem ser classificados pela potência gerada, forma construtiva e pelos tipos de pás (MACEDO, 2015). Em relação à potência gerada, classificam-se como:

- Pequeno porte – até 50 kW de potência;
- Médio porte – de 50 kW até 1MW de potência;
- Grande porte – acima de 1 MW de potência;

Em relação à forma construtiva definem-se como sendo VAWT ou HAWT, dentre essas classificações, o tipo de pá é definido como sendo de arrasto ou sustentação. Exemplos em relação à forma construtiva podem ser observados na Figura 2.

Figura 2– Exemplos de turbinas eólicas quanto a forma construtiva



Turbina do tipo HAWT a esquerda e VAWT do tipo Savonius do lado direito.

Fonte: GWEC, 2016 e ECOMONDO, 2011.

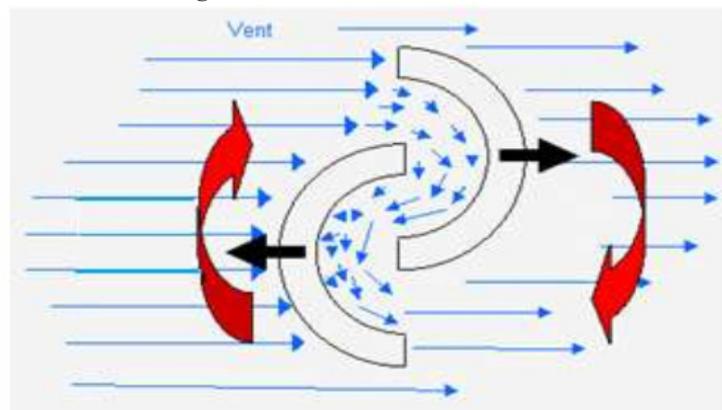
2.2.1. Turbina Eólica de Eixo Vertical

Essa seção faz um comparativo e detalha as principais características de funcionamento das turbinas de eixo verticais mais usuais.

2.2.1.1. Turbina Eólica Savonius

Desenvolvido na década de 30 pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius, baseia-se no princípio do acionamento diferencial. Neste modelo, os ventos incidem nas faces do corpo oco em intensidades diferentes que resulta no movimento rotativo do rotor, observado na Figura 3.

Figura 3– Turbina eólica Savonius



Fonte: CRESESB, 2001.

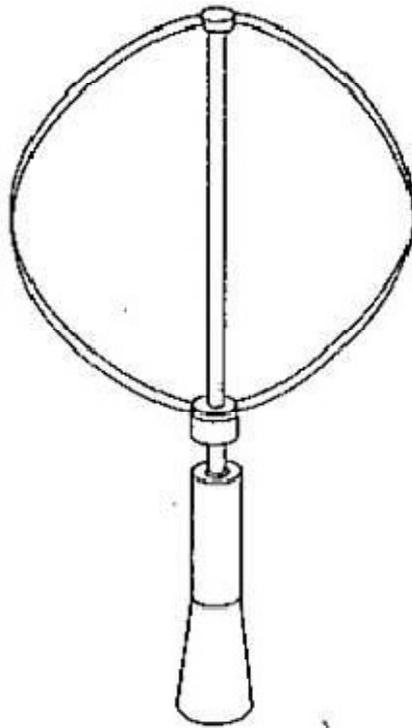
Devido às suas características operacionais, as turbinas Savonius possuem diferentes aplicações. As mais comuns são: bombeamento de água (utilizando bomba de deslocamento positivo), geração de energia elétrica, como dispositivo de partida de outros aerogeradores, na ventilação ou exaustão de ambientes fechados, entre outros.

Esse modelo, assim como os aerogeradores de pequeno porte, é de simples instalação, não necessita de mecanismo de orientação de vento, nem requer fonte de energia externa para acionamento, podem ser instalados próximos ao solo, o que diminui perdas por longas linhas de transmissão e facilita a manutenção, opera em baixas rotações, o que resulta em menor desgaste dos componentes da turbina e menor poluição sonora. Fatores esses que garantem baixo custo e pouca complexidade em relação à HAWT.

2.2.1.2. Turbina Eólica tipo Darrieus

Desenvolvida em 1927 pelo engenheiro francês George J. M. Darrieus, é geralmente constituído por duas ou três pás em forma de arco, sendo movida por força de sustentação. Apesar de ser uma turbina com boa eficiência, ela é considerada uma turbina de baixa confiabilidade, pelas oscilações de torque e de estresse cíclico na torre (AMARAL, 2011). Este modelo pode ser observado na Figura 4.

Figura 4– Turbina eólicas de eixo vertical do tipo Darrieus.



Fonte: Adaptado de Macedo, 2012.

O aerogerador do tipo Darrieus apresenta a desvantagem de possuir um torque de partida muito baixo, necessitando de uma fonte de alimentação externa.

2.3. Panorama de Energia Eólica no Brasil

Segundo a ANEEL (2016), a capacidade instalada no Brasil é de 8,2 GW, gerados por turbinas de médio e grande porte conectadas a rede elétrica. A localização de cada central eólica do Brasil, pode ser observada na Figura 5.

Figura 5– Centrais eólicas instaladas.

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2016.

Segundo o atlas eólico brasileiro, o Nordeste é uma região com grande potencial eólico. Como observado na Figura 5, este potencial está sendo efetivamente aproveitado, sabendo que uma considerável parcela da produção eólica no país está instalada nessa região.

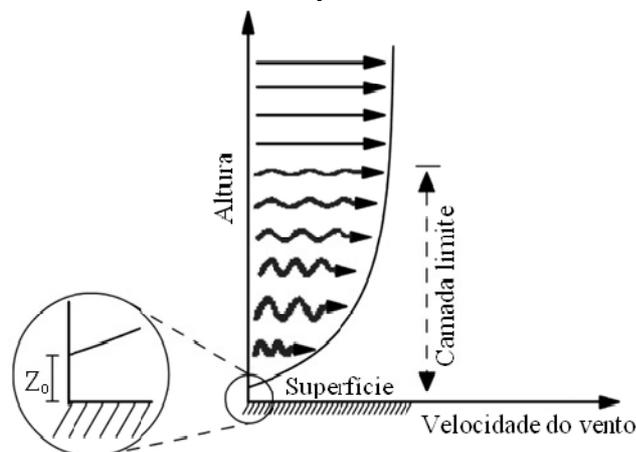
Aliado aos parques eólicos, existem turbinas de pequeno porte em locais isolados ou centros urbanos operando em diversas aplicações. Frente a isso, em 17 de abril de 2012, a ANEEL regulamentou a Resolução nº 482, que “regulamenta as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e sobre o sistema de compensação de energia elétrica, além de dar outras providências.” (CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2014). Esta resolução aborda a geração quanto às fontes hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, e quanto ao porte. Sendo considerada primordial para a expansão da tecnologia e utilização de aerogeradores de pequeno porte em residências, universidades, empresas, entre outros.

O investimento em tecnologias reduziu os custos de instalação de aerogeradores de pequeno porte, elevando o número de consumidores e empresas instaladas no Brasil. Em pesquisa realizada com cinco empresas, destacou-se a decisão pelo investimento no modelo de eixo vertical, motivada para aplicações residenciais urbanas, pois esta tecnologia tem um aproveitamento teórico melhor em ventos turbulentos do que as máquinas convencionais de eixo horizontal, além de ser mais silencioso (DUTRA *et al*, 2015).

2.4. Características do Vento

A camada limite superficial, está contida na camada limite atmosférica, e compreende a região do solo, até uma altura de 100 a 120 metros. “Nesta camada ocorrem grandes variações da temperatura, umidade e do vento com a altura, fazendo com que trocas turbulentas mais intensas de momentum, calor e umidade ocorram na mesma” (LINARD, 2010). A Figura 6 mostra a variação da velocidade do vento dentro da camada limite superficial através do perfil de velocidade.

Figura 6 - Perfil vertical da velocidade do vento



Fonte: Adaptada de Martins *et al.* (2008) *apud* Linard (2010).

Compreender o que acontece nessa região é de suma importância para diversas aplicações. Tais como desenvolvimento de foguetes, pousos com segurança, propagações de ondas eletromagnéticas, aplicações eólicas, entre outros.

A descrição do escoamento se faz pelas velocidades instantâneas obtidas nessa área. Para extrapolação da velocidade para uma altura requerida pode se fazer uso de duas leis, a logarítmica e a de potência.

2.4.1. Extrapolação Vertical do Vento

Os dois modelos matemáticos, a lei logarítmica e a lei de potência, são os mais utilizados para a estimativa de variação de velocidade de vento com a altura (MANWELL *et al.*, 2002). “A lei logarítmica é uma combinação de pesquisa teórica e empírica originada do fluxo da camada limite em dinâmica dos fluidos. Esta lei é usada para variação de velocidade

de vento vertical modelada em uma condição de terreno particular” (CAMELO *et al.*, 2010). Esta lei é expressa pela Eq. 1:

$$V(z) = V_r \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (1)$$

Onde z_r representa a altura de referência em metros, z é a altura requerida, V_r a velocidade nesta altura de referência em metro por segundo e z_0 é o comprimento de rugosidade em metro.

Semelhante a esse modelo tem-se a lei de potência. Que pode ser representada pela Eq. 2:

$$V(z) = V_r \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (2)$$

Onde α é o expoente de camada limite e varia em função da rugosidade da superfície. Essa relação é representada pela Eq. 3 (MANWELL *et al.*, 2002):

$$\alpha = 0,096 \log_{10} z_0 + 0,016(\log_{10} z_0)^2 + 0,24 \quad (3)$$

2.4.2. Função de Densidade de Probabilidade

Segundo Acunha Jr. *et al.* (2006), muitos pesquisadores demonstraram que a função de densidade de probabilidades de Weibull, Eq. 4 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001), é um modelo mais adequado para caracterizar a distribuição de velocidades do vento em diversas regiões.

$$f(V) = k \frac{V^{k-1}}{c^k} \exp \left[- \left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (4)$$

Na Eq. 4, c representa o fator de escala, e pode ser determinado pela Eq. 5 (LYSEN, 1983), dado em unidade de velocidade, enquanto que k representa o fator de forma e pode ser determinado pela Eq. 6 (GUPTA, 2010).

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad [m/s] \quad (5)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{U} \right)^{-1,086} \quad (6)$$

O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB (2001) disponibiliza informações destes parâmetros para todo o Brasil com dados de k a partir da localização geográfica. Um valor de k próximo de 1 indica um regime de vento variável, enquanto que k maior que 3, indica um regime estável de vento.

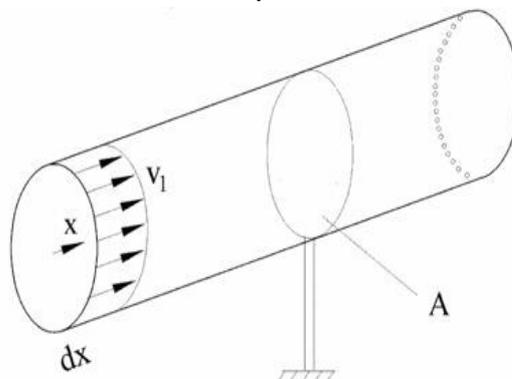
Outra função de densidade de probabilidade é a de Rayleigh, representada pela Eq. 7, que é uma simplificação da Distribuição de Weibull, usando $k = 2$. Esta equação é de uso limitado, uma vez que utiliza apenas a velocidade média, o que a torna imprecisa para algumas aplicações, principalmente em condições em que a velocidade do vento são altas (MACEDO, 2002 *apud* ACUNHA *et al.*, 2006).

$$f(V) = 2 \frac{v}{c^2} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right] \quad (7)$$

2.4.3. Determinação do Potencial Eólico

O potencial eólico é definido como a energia cinética, passando, por unidade de tempo, em uma coluna de ar com a mesma área de seção transversal de varredura das pás em rotação, viajando a uma velocidade V (MELLO, SILVA, 2003), como mostra a Figura 7. Este nos dá a potência presente no vento que poderá ser convertida em energia pela turbina do aerogerador.

Figura 7 - Fluxo de ar através de uma área transversal A



Fonte: CRESESB, 2008.

A energia cinética de uma massa de ar m , movimentando-se a uma velocidade V , é dada pela Eq. 8:

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (8)$$

A vazão em massa de ar, \dot{m} , dada em kg/s pode ser então, determinada através da Eq. 9:

$$\dot{m} = \rho AV \quad (9)$$

Onde ρ é a massa específica do ar, V é a velocidade do vento e A , área projetada pelo rotor.

Assim o potencial eólico, dado pela energia por unidade de tempo numa massa de ar, pode ser escrito conforme Eq. 10:

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (10)$$

Considerando o rendimento global do sistema, E , a potência extraída pelo aerogerador pode ser determinada a partir da, Eq. 11:

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 E \quad (11)$$

2.4.4. Rendimento Global

Um fator importante de dimensionamento de turbina eólica é o rendimento global do sistema, E . Que é dado pelo produto dos rendimentos do rotor, E_R , do gerador, E_G e da transmissão, E_T , Eq. 12.

$$E = E_R \cdot E_G \cdot E_T \quad (12)$$

O rendimento global de um aerogerador está limitado ao limite de Bertz. Em HAWT, o rendimento global máximo é de 47%, enquanto que nas do tipo VAWT, esse valor não ultrapassa 37% (AL-BAHADLY, 2009).

2.4.5. Limite de Bertz

Extrair toda a energia disponível no vento significaria dizer que toda a energia cinética do vento foi aproveitada e conseqüentemente a velocidade do vento na saída do rotor seria nula. Nesse caso o rotor estaria funcionando como uma barreira, cessando o fluxo do vento, provocando uma potência nula. Da mesma forma, se nenhuma energia for extraída do vento, ou seja, se a velocidade na entrada do rotor for igual à velocidade de saída a potência também será nula. Percebe-se então que há um limite de extração de energia cinética do vento.

O coeficiente de potência aerodinâmico, C_p , é dado pela relação entre a potência extraída do vento pela turbina P_E , e a potência disponível no vento P_V , Eq. 13.

$$C_p = \frac{P_E}{P_V} \quad (13)$$

O Limite de Bertz indica o valor máximo do rendimento que o aerogerador pode atingir. Para um coeficiente de potência $C_{p,Bertz} = 0,593$, têm-se que apenas 59,3% da potência disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica.

2.4.6. Determinação de Produção de um Aerogerador

A potência elétrica representa a energia transferida por unidade de tempo, e é medida em Watt (W).

De acordo com Lopes e Almeida (2003), pode-se determinar a energia capturada por um aerogerador pelo somatório do produto da potência que a máquina consegue extrair do vento, da função de Weibull e do número de horas que determinada velocidade ocorre no local. A Eq. 14 é utilizada para se estimar a energia capturada durante o período de um ano.

$$PE = \sum \frac{P \cdot f(V) \cdot 8760}{1000} \quad (14)$$

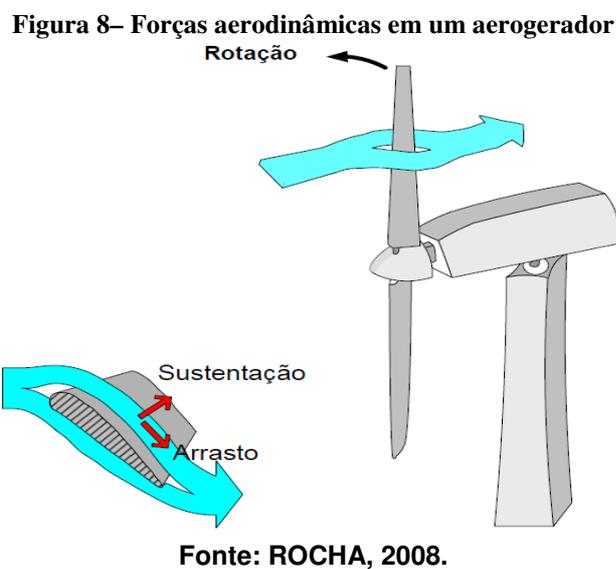
2.5. Forças Aerodinâmicas

De acordo com a forma de interação do vento com as pás das turbinas eólicas, elas são classificadas em turbinas de arrasto e de sustentação.

As turbinas de arrasto são aquelas em que o vento empurra as pás forçando o rotor a girar. Nestas turbinas, a velocidade das pás não pode ser maior que a velocidade do vento, o que limita sua eficiência.

As turbinas de sustentação, por sua vez, utilizam características aerodinâmicas similares à das asas dos aviões, onde o vento passa mais rapidamente sobre o lado mais longo da superfície da pá (área de baixa pressão). O diferencial de pressão entre as duas superfícies resulta em uma força de sustentação. Em uma asa de avião, isto ocasiona uma força de sustentação, já nas turbinas irá ocasionar sua rotação, uma vez que estas são confinadas pelo cubo para se mover em um plano (ROCHA, 2008).

A força aerodinâmica em um aerogerador é a resultante das componentes de sustentação, F_S e arraste, F_A , como mostra a Figura 8.



Para o cálculo da força de arraste do vento, F_V , que incide em uma turbina, utiliza-se a Eq. 15 (WHITE, 2009):

$$F_V = C_A \frac{1}{2} \rho AV^2 \quad (15)$$

onde: C_A corresponde ao coeficiente de arrasto ou de resistência.

A Tabela 2 apresenta o valor do coeficiente de arrasto para diversas formas geométricas usuais.

Tabela 2 – Coeficiente de arrasto

| Formato Geométrico | C_A |
|----------------------|-------|
| Cilindro circular | 1,2 |
| Haste quadrada | 2,0 |
| Semicircular côncavo | 2,3 |
| Semicircular convexo | 1,2 |
| Cilindro elíptico | 0,6 |
| Hemisférico côncavo | 1,4 |
| Hemisférico convexo | 0,39 |

Fonte: Adaptado de White, F. M., 1999.

3 METODOLOGIA

A sequência seguida neste trabalho encontra-se discriminada a seguir:

- Estima-se os parâmetro de Weibull, k (fator de forma) e c (fator de escala), e a velocidade média anual do vento, através da localização geográfica utilizando ferramenta disponível pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB (2001); Outro método de se determinar estes parâmetros seria utilizando a Eq. 5 e Eq. 6, como dito no capítulo anterior.
- Calcula-se a distribuição de frequência de Weibull $f(V)$, Eq.4 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001).
- Elaborar-se o histograma de dados de simulação do vento próximo ao local utilizando informações de 1979 a 2016, utilizando o ERA-Interim. O ERA-Interim é a mais recente reanálise atmosférica global produzida pelo ECMWF. Seu período de cobertura se inicia em 1979 e continua até o presente momento. Os produtos dessa reanálise são dados gradeados que incluem uma larga variedade de parâmetros de superfície com resolução de 3h, que descrevem tanto o clima como ondas oceânicas e condições da superfície terrestre. Incluem também parâmetros aéreos com resolução de 6h, que cobrem a troposfera e a atmosfera (Dee et al., 2011).
- Calcula-se a velocidade característica do vento, V_k , determinada pelo produto entre a velocidade básica do vento, V_0 , e os fatores topográfico (S_1), rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura do terreno (S_2) e estatístico (S_3), dada pela Eq. 16 (NBR 6123/1988).

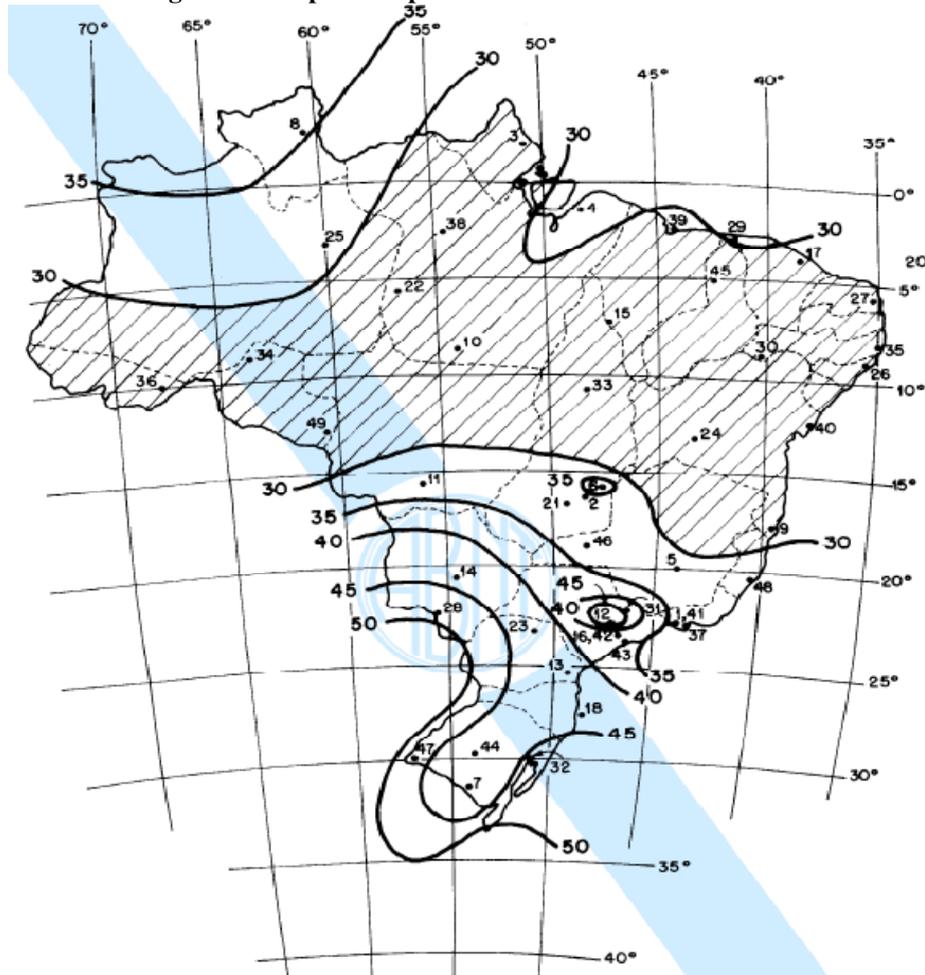
$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (16)$$

Onde a velocidade básica do vento considera a velocidade de rajada do vento em 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano. Representado em gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil, Figura 13. O fator topográfico considera as variações do relevo do terreno e o fator S_2 utilizado para calcular a velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido pela Eq. 17 (NBR 6123/1988).

$$S_2 = bF_r(z/10)^P \quad (17)$$

Os parâmetros da Eq. 17, são determinados considerando Tabela 3 (NBR 6123/1988). E F_r é o fator de rajada. O fator estatístico S_3 considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, Tabela 4.

Figura 9 – Mapa de isopletas da velocidade básica do vento



Fonte: NBR 6123/1988.

Tabela 3– Parâmetros meteorológicos

| Categoria | Zg (m) | Parâmetro | Classes | | |
|-----------|--------|-----------|---------|-------|-------|
| | | | A | B | C |
| I | 250 | b | 1,10 | 1,11 | 1,12 |
| | | p | 0,06 | 0,065 | 0,07 |
| II | 300 | b | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | | Fr | 1,00 | 0,98 | 0,95 |
| III | 350 | p | 0,085 | 0,09 | 0,10 |
| | | b | 0,94 | 0,94 | 0,93 |
| IV | 420 | p | 0,10 | 0,105 | 0,115 |
| | | b | 0,86 | 0,85 | 0,84 |
| V | 500 | p | 0,12 | 0,125 | 0,135 |
| | | b | 0,74 | 0,73 | 0,71 |
| | | p | 0,15 | 0,16 | 0,175 |

Fonte: NBR 6123/1988

Tabela 4 – Valores mínimos do fator estatístico, S_3

| Grupo | Descrição | S_3 |
|-------|---|-------|
| 1 | Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro à pessoas após uma tempestade destrutiva. | 1,10 |
| 2 | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação. | 1,00 |
| 3 | Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação. | 0,95 |
| 4 | Vedações | 0,88 |
| 5 | Edificações temporárias. Estruturas do grupo 1 a 3 durante a construção. | 0,83 |

Fonte: NBR 6123/1988

- Dimensiona-se o rotor, definindo o diâmetro, altura e sobreposição das pás;
- Os principais carregamentos que a turbina está submetida são: a força de arrasto do vento, dada pela Eq. 15, o peso e os momentos de flexão e de rotação. Utiliza-se a Eq. 18 para determinar o momento de rotação (torque):

$$M_{ROT} = C_m \frac{1}{4} \rho D A V^2 \quad (18)$$

Onde C_m é o coeficiente de momento da força, D é o diâmetro do rotor, e as demais semelhantes à Equação 15.

- Dimensiona-se o rolamento inferior;
- Dimensiona-se o eixo de rotação da turbina;
- Testa-se o fator de segurança à fadiga no eixo da turbina eólica vertical utilizando o Critério de Soderberg, Eq. 19 (SHIGLEY, 2005). Para isso, é necessário identificar as tensões provocadas pelas cargas. Sabendo que o eixo está submetido à flexão, cisalhamento e torção.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (19)$$

- Simula-se o comportamento do eixo, utilizou-se o programa AutoDesk Inventor;
- Determina-se a potência extraída pela máquina, utilizando a Eq. 11.
- Determina-se a produção anual de energia (PAE),
- Determina-se a demanda energética anual.

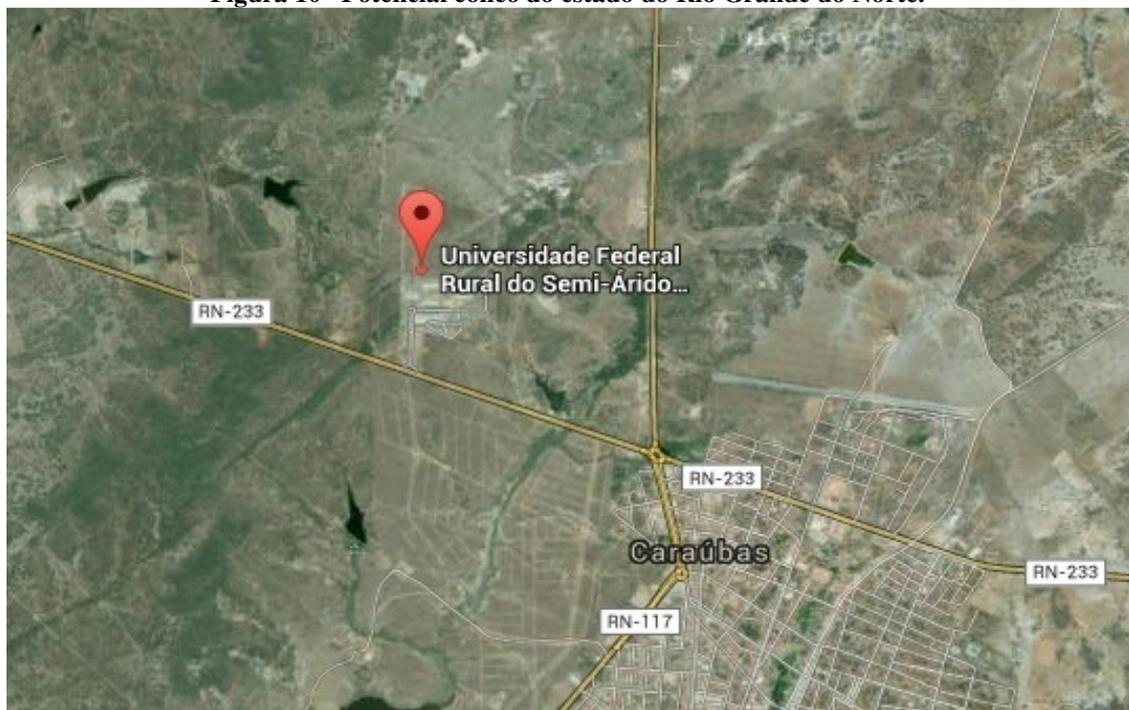
4 PROJETO E DIMENSIONAMENTO

Essa seção contém a análise dos resultados obtidos.

4.1 Determinação da Velocidade Média Anual do Vento e Parâmetros de Weibull

Sabendo que a localização geográfica da UFERSA em Caraúbas - RN em coordenadas é 5,25° S e 37,5° O (Google Earth[®]), utilizou-se como ponto de referência para levantamento dos dados iniciais necessários. Esse ponto pode ser observado na Figura 10, a seguir:

Figura 10– Potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: Adaptado de Google Earth[®].

O valor de k encontrado para este estudo é um valor médio aproximado de 2,36, o valor de c calculado é de, aproximadamente, 6,08 e a velocidade média anual do vento é 5,39 m/s. Conforme podem ser vistos na Tabela 4, a seguir:

Tabela 5 - Velocidade média anual e parâmetros de Weibull: fator de forma e escala.

| Parâmetros de Weibull | | | | | |
|-----------------------|---------|----------|---------|---------|-------|
| | DEZ-FEV | MAR- MAI | JUN-AGO | SET-NOV | ANUAL |
| k | 2,50 | 2,08 | 2,93 | 2,83 | 2,36 |
| c | 6,45 | 4,58 | 5,62 | 7,58 | 6,08 |
| $V (m/s)$ | 5,72 | 4,06 | 5,01 | 6,75 | 5,39 |

Fonte: A autora

4.2 Distribuição de frequência de Weibull

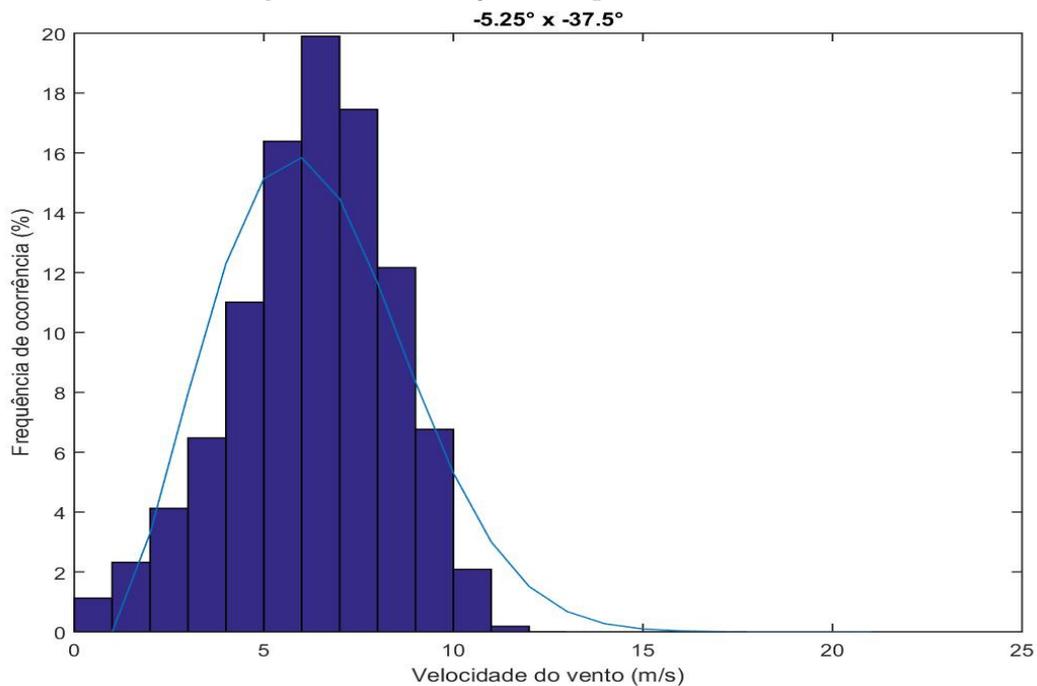
Determinou-se a distribuição de frequência de Weibull ($f(V)$) para uma variação de velocidade de 0 a 20 m/s, utilizando a Eq. 4, onde k e c são os valores da Tabela 5 e construiu-se a Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição de frequência de Weibull

| Velocidade (m/s) | Dez-Fev | Mar-Mai | Jun-Ago | Set-Nov | Anual |
|------------------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 0 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 1 | 2% | 7% | 2% | 1% | 3% |
| 2 | 6% | 15% | 7% | 3% | 8% |
| 3 | 11% | 20% | 13% | 6% | 12% |
| 4 | 14% | 20% | 19% | 10% | 15% |
| 5 | 16% | 17% | 20% | 13% | 16% |
| 6 | 15% | 11% | 18% | 15% | 14% |
| 7 | 13% | 6% | 12% | 15% | 12% |
| 8 | 10% | 3% | 6% | 13% | 8% |
| 9 | 6% | 1% | 2% | 10% | 5% |
| 10 | 4% | 0% | 1% | 7% | 3% |
| 11 | 2% | 0% | 0% | 4% | 2% |
| 12 | 1% | 0% | 0% | 2% | 1% |
| 13 | 0% | 0% | 0% | 1% | 0% |
| 14 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 15 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 16 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 17 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 18 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 19 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 20 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Fonte: A autora

Figura 11 - Distribuição de frequência de Weibull



Fonte: A autora

A linha azul da Figura 11 foi obtida a partir dos valores da Tabela 5, e corresponde à distribuição de frequência de Weibull, já o gráfico em barras é o histograma de dados de simulação do vento próximo ao local utilizando informações de 1979 a 2016, utilizando o ERA-Interim.

4.3 Cálculo da Velocidade Característica do Vento

Para projetar o aerogerador considera-se a velocidade característica do vento, V_k , determinada pela Eq. 16. Considerando o local de instalação, $V_0 = 30$ m/s.

O fator topográfico adotado foi o de terreno plano ou fracamente acidentado, $S_1 = 1,0$. O fator S_2 foi obtido utilizando a Eq. 17. Os parâmetros da equação, foram determinados utilizando a Tabela 3, considerando a categoria IV, “terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada”, classe a, “edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m”(NBR 6123/1988). E F_r é o fator de rajada igual a 1,0. Logo, utilizando a Eq. 17, $S_2 = 0,79$.

Utilizando a Tabela 4, considerando o Grupo 5: Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção, o fator estatístico é $S_3 = 0,83$.

Portanto, a velocidade característica do vento obtida é 20 m/s. E será utilizada para determinar os carregamentos na turbina Savonius.

4.4 Dimensionamento do Rotor

Para a construção das pás do rotor, sugere-se utilização de duas bombonas plástica com capacidade para 200 litros, com altura de 890 mm e diâmetro de 585 mm Semelhante ao modelo da Figura 12.

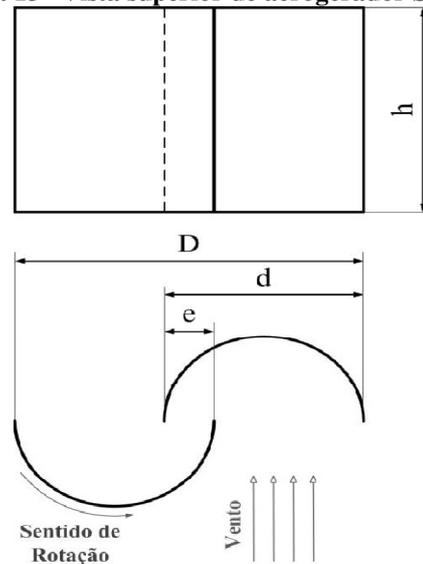
Figura 12– Bombona plástica com capacidade para 200 litros



Fonte: Mega Ambiental, 2016.

O parâmetro que influencia a aerodinâmica do rotor Savonius é a constante β , dada pela razão entre a sobreposição das pás, e , e o diâmetro, d , desta, mostrado na Figura 13. Segundo Menet (2004), os resultados que revelaram maior eficiência do rotor são para valores de β entre 0,2 e 0,3. Portanto, o valor de β adotado para este trabalho, será o valor intermediário em relação ao ideal, sendo $\beta = 0,25$. Conseqüentemente, a sobreposição das pás deve ser de 146 mm.

Figura 13– Vista superior de aerogerador Savonius



Fonte: Olo, 2012

Com um par de pás é possível obter valores interessantes para o coeficiente de potência, e aumentar essa quantidade iria influenciar negativamente na performance da turbina (MENET, 2004). Quanto ao número de andares, indica-se que com dois andares, o momento de arranque inicial é menor, o que resultaria em maior estabilidade no rotor, e ainda o aumento nessa configuração não influenciaria o rendimento do aerogerador. Sendo assim, optou-se por um aerogerador de dois andares, composto por duas pás por andar, com altura de 1.780 mm e diâmetro total de 1.024 mm. Para essa configuração, a área projetada pelo rotor, considerando dois andares, é de 1,82 m².

4.5 Carregamentos aplicados ao rotor

O rotor que pretende-se utilizar seria um semelhante à Figura 4, tendo dois andares, por motivos já explicados anteriormente.

Determina-se a força de arraste do vento, F_V , que incide na turbina Savonius, utilizando a Eq. 15. Para os cálculos deste trabalho, considera-se o valor do coeficiente, para uma geometria semicircular com sentido do escoamento voltado para o lado côncavo desta sendo $F_V = 1.025,57$ N.

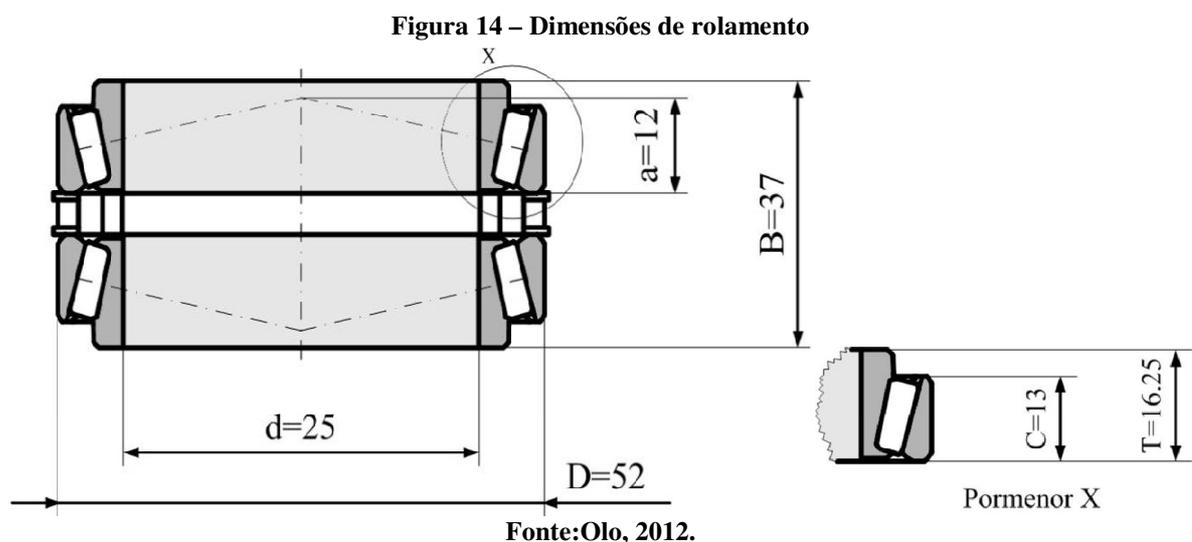
Essa força irá influenciar o momento fletor M_f , determinado pelo produto entre a força de arraste do vento, aplicada no centróide do rotor, e a distância desta até o suporte. Logo, $M_f = 912,76$ N·m.

Utiliza-se a Eq. 18 para determinar o momento de rotação (torque). Sendo C_m adotado como 0,2, e as demais semelhantes à Equação 15. Logo, o momento de rotação é 45,66 N·m.

Considerando a massa do rotor de 15 kg por andar (sendo 10kg das pás e 5 kg demais componentes de fixação), o peso do rotor é 294,30N.

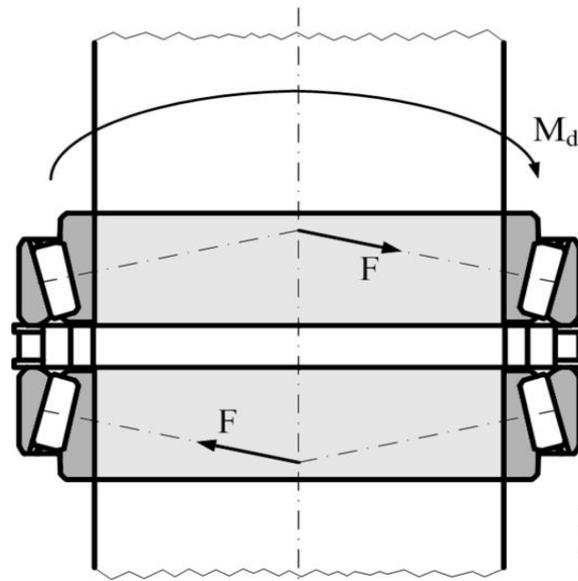
4.6 Dimensionamento de rolamento

Pretende-se utilizar o rolamento autocompensador de rolos cônicos, pois estes permitem o autoalinhamento, fazendo com que não ocorra carga anormal no rolamento, além de possuir grande capacidade de suportar cargas radiais. Selecionou-se o rolamento da marca SKF (ref: 445539 BA), com diâmetro externo, D , de 52 milímetros, diâmetro interno, d , de 25 milímetros, altura, B , de 37 milímetros, semelhante ao ilustrado na figura 14.



Para dimensionar o rolamento a ser utilizado no suporte da turbina, consideram-se as forças atuantes no interior do rolamento, e o momento fletor, conforme pode ser visto na Figura 15.

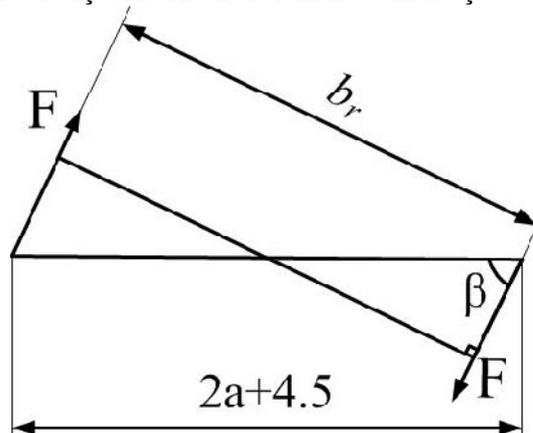
Figura 15– Forças e Momento atuantes no rolamento



Fonte: Olo, 2012

Para determinar o módulo da força, calcula-se o valor do ângulo β_{rol} , que representa o valor da inclinação da força em relação ao eixo de rotação do rolamento, representado na figura 16.

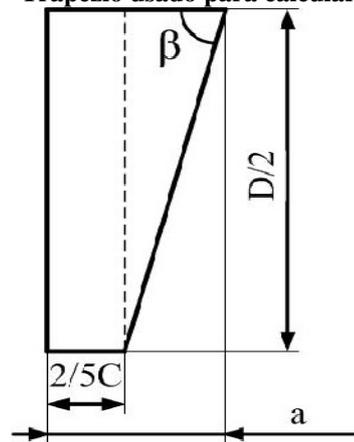
Figura 16– Forças interna no rolamento e indicação do ângulo β



Fonte: Olo, 2012

Com o auxílio da Figura 15, obteve-se o valor de β_{rol} igual a $75,34^\circ$. E o valor do comprimento do braço obtido, utilizando a Figura 14, foi 27,57 mm. Com os dados acima, calcula-se a força interna do rolamento. Sabendo que o momento fletor calculado foi 912,76 N·m, têm-se que a força interna resultante é dada pela razão entre o momento fletor e o comprimento do braço, logo $F = 33.107$ N. Decompondo essa força resultante em componentes radial e axial, têm-se, respectivamente, 32.029 N e 8.378 N.

Figura 17– Trapézio usado para calcular o ângulo β



Fonte: Olo, 2012

Para determinar a carga dinâmica equivalente do rolamento P , utiliza-se as Eq. 20 e 21 (SKF, 2016):

$$P = F_R, \text{ quando } \frac{F_A}{F_R} \leq e \quad (20)$$

$$P = 0,4F_R + YF_A, \text{ quando } \frac{F_A}{F_R} > e \quad (21)$$

Onde, as variáveis Y e e , são valores tabelados, que para esse modelo possuem os seguintes valores, respectivamente, 1,6 e 0,37. Sendo assim, o valor da carga equivalente é 32.029 N. O que evidencia que a força que está exercendo maior influência na vida útil do rolamento é a força radial, que tem a mesma direção da força do vento.

4.7 Dimensionamento do eixo de rotação

O eixo de rotação é o responsável por transmitir a potência do vento, extraída pelo rotor, até o multiplicador de velocidade. Foi dimensionado em função da seção mais solicitada, com diâmetro de 25 mm. O material escolhido foi o aço AISI 4340, normalizado. Para calcular o limite de resistência à fadiga no local crítico, dado pela Eq. 22, é necessário definir seis coeficientes (SHIGLEY, 2005).

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (22)$$

- K_a : Fator de modificação de condição de superfície, dado pela Eq. 23 (SHIGLEY, 2005):

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b \quad (23)$$

Onde: S_{ut} = Resistência à tração mínima do material, e os parâmetros a e b são encontrados em tabela que define-os segundo à qualidade do acabamento superficial.

- K_b : Fator de modificação de tamanho, dado pela Eq. 24 (SHIGLEY, 2005):

$$K_b = \left(d_{eixo} / 7,62 \right)^{-0,107} \quad (24)$$

- K_c : Fator de modificação de carga, é um valor fixo em função do carregamento ao qual está submetido. Segundo Shigley (2005), quando o eixo está submetido à torção combinado com flexão, o valor considerado deve ser 1.
- K_d : Fator de modificação de temperatura, utiliza-se o valor para condições de temperatura ambiente, 30° C.
- K_e : Fator de confiabilidade, valor tabelado para os principais valores de confiabilidade, aqui considera-se 95%:
- K_f : Fator de modificação por efeitos variados, considera-se um eixo de diâmetro contínuo.
- S'_e : Limite de resistência de corpo de prova para viga rotativa, onde o valor considerado foi a metade do S_{ut} do material.

O fator de segurança à fadiga no eixo da turbina eólica vertical será calculado utilizando o Critério de Soderberg, Eq. 19. Para isso, primeiro precisamos identificar as tensões provocadas pelas cargas. Sabendo que o eixo está submetido à flexão, cisalhamento e torção.

O eixo está fixo apenas em uma extremidade pelo rolamento. Segundo Beer (2012), para uma viga em balanço de comprimento L que suporta uma carga uniformemente distribuída, F , o cisalhamento e momento são dados pelas Eq. 25 e 26.

$$V = F \cdot L \quad (25)$$

$$M = \frac{1}{2} \cdot F \cdot L^2 \quad (26)$$

Segundo Beer (2012), as tensões de flexão, cisalhamento e a devido à torção, são dadas pelas Eq. 27, 28 e 29, respectivamente.

$$\sigma = \frac{M \cdot r}{I} \quad (27)$$

$$\tau_1 = \frac{4 \cdot V}{3 \pi r^2} \quad (28)$$

$$\tau_2 = \frac{T \cdot r}{J_0} \quad (29)$$

onde: T é o torque (calculado anteriormente), I é o momento de inércia, e J_0 é o momento de inércia polar. Para um cilindro, são determinados utilizando as Eq. 30 e 31 (BEER, 2012).

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (30)$$

$$J_0 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^4 \quad (31)$$

Para determinar as tensões principais, σ_{max} e σ_{min} , utiliza-se a Eq. 32 (BEER, 2012):

$$\sigma_{max,min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (32)$$

Onde τ_{xy} é a soma das tensões de cisalhamento, calculadas anteriormente. Por Von Mises, definimos a tensão equivalente (σ_e) e as componentes de tensão alternante (σ_a) e tensão média, (σ_m), utilizando, respectivamente, as Eq. 33, 34 e 35 (BEER, 2012).

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (33)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (34)$$

$$\sigma_a = \frac{|\sigma_{max} - \sigma_{min}|}{2} \quad (35)$$

Agora com todos os valores já calculados, pelo Critério de Soderberg, Eq. 19, é dado o fator de segurança à fadiga do eixo, n . Os valores calculados, encontram-se sintetizados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Resumo dos resultados obtidos

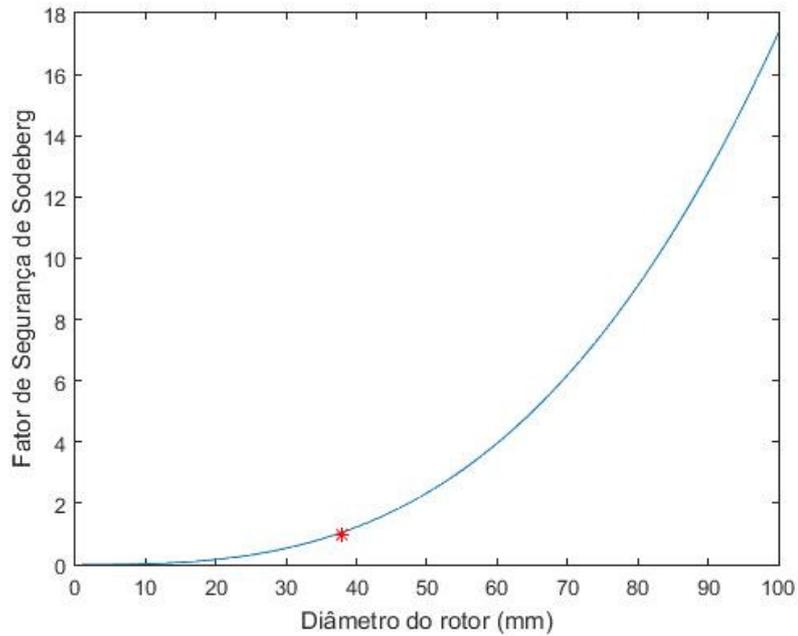
| Componente | Valor |
|----------------|---------------|
| S_{ut} | 1282 MPa |
| S_y | 862 MPa |
| K_a | 0,34 |
| K_b | 0,88 |
| K_c | 1 |
| K_d | 1 |
| K_e | 0,868 |
| K_f | 1 |
| S'_e | 641 MPa |
| S_e | 166,47 MPa |
| V | 1863,46 N |
| M | 1692,95 N · m |
| σ | 1100 MPa |
| τ_1 | 5,06 MPa |
| τ_2 | 14,88 MPa |
| τ_{xy} | 19,94 MPa |
| σ_{max} | 1100 MPa |
| σ_{min} | 0 MPa |
| σ_e | 1100 MPa |
| σ_m | 550 MPa |
| σ_a | 550 MPa |
| n | 0,25 |

Fonte: A autora.

Percebe-se que o valor encontrado para o fator de segurança à fadiga foi menor que 1, o que mostra que o eixo dimensionado não é ideal para suportar os carregamentos da turbina.

Considerando os cálculos acima, elaborou-se o gráfico representado na Figura 18, no qual estima-se o valor do fator de segurança à fadiga em relação ao diâmetro do eixo. Sendo assim, percebe-se que, para essas condições, o eixo deveria ter um diâmetro superior à 38 mm.

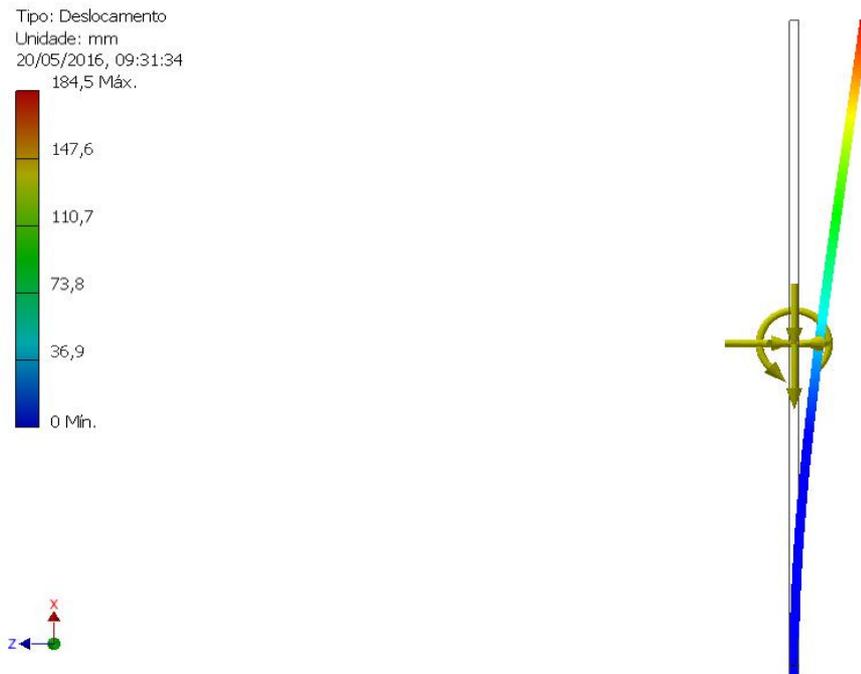
Figura 18– Fator de segurança estimado em relação ao diâmetro do eixo



Fonte: A autora

Com a finalidade de simular o comportamento do eixo, utilizou-se o programa AutoDesk Inventor, com todos os carregamentos. A Figura 19, mostra o deslocamento máximo apresentado pelo eixo.

Figura 19– Simulação do comportamento do eixo fixado em uma extremidade



Fonte: A autora

Simulou-se o comportamento do eixo utilizando como material o aço AISI 4130, com têmpera em água e diâmetro 25 mm. Com resistência superior ao aço escolhido inicialmente, porém este não suportaria aos carregamentos sem apresentar deslocamento em relação à linha de centro. Sendo assim, simulou-se, para o mesmo material, o comportamento deste como uma viga bi apoiada, Figura 19. E obteve-se o resultado esperado.

Figura 20– Simulação do comportamento do eixo fixado em duas extremidades



Fonte: A autora

4.8 Produção anual de energia

Para determinar a potência extraída pela máquina, utiliza-se a Eq. 11. Estima-se o rendimento global como sendo 20,25%, considerando 25% de eficiência do rotor e 90% de eficiência para o gerador e transmissão (M.Z.,2013), resultando em potencial eólico da turbina de 35,40 W. Equivalente a 310 kWh/ano.

4.9 Demanda energética anual

Determinou-se a demanda energética anual, tendo como base o consumo da UFERSA, segundo a Companhia Energética do Rio Grande do Norte – COSERN, no período de janeiro a dezembro de 2015, listados na Tabela 7, a seguir:

Tabela 7 – Consumo energético da UFERSA

| Mês | Consumo (kWh) | Valor Devido (R\$) |
|---------------------|------------------|--------------------|
| Janeiro | 59.759,42 | 29.256,72 |
| Fevereiro | 43.116,92 | 25.497,07 |
| Março | 55.731,48 | 31.721,45 |
| Abril | 46.767,70 | 28.307,41 |
| Maio | 47.450,62 | 29.847,44 |
| Junho | 62.275,92 | 40.620,65 |
| Julho | 29.532,58 | 25.521,07 |
| Agosto | 25.794,86 | 22.179,01 |
| Setembro | 26.846,26 | 25.906,67 |
| Outubro | 26.428,08 | 23.053,86 |
| Novembro | 31.052,14 | 24.111,01 |
| Dezembro | 58.322,46 | 37.344,69 |
| Média Mensal | 42.756,54 | 28.613,92 |

Fonte: A autora.

5 CONCLUSÃO

Atualmente percebem-se quedas constantes de energia e apagões. Para um país emergente como o Brasil é importante a distribuição de energia constante, e para isso necessita-se da descentralização da produção de eletricidade em âmbito nacional, uma vez que esta é cada vez mais dependente de chuvas.

A construção de uma turbina eólica vertical apresenta um custo elevado para que se torne um item comum nas residências. Porém, a competitividade de empresas desse setor, resulta em otimização da fabricação, redução de custos e melhoria na eficiência. Por outro lado, o valor cobrado da energia elétrica pelas concessionárias só aumenta.

A turbina projetada seria capaz de fornecer 310 kWh/ano, enquanto a demanda energética da UFERSA, no ano de 2015 foi 513.078,44 kWh, sendo necessário mais de 1650 turbinas para atender a demanda total. Caso seja implementado na rede elétrica o sistema de injeção de energia, seria possível diminuir o valor com gastos elétricos. A instalação desse tipo de turbina em meio rural, teria maior impacto, uma vez que o consumo médio residencial, para essa região é de 112 kWh (COSERN, 2013), além de incentivar o mercado de microgeração energética.

Concluiu-se também que o eixo da turbina Savonius inicialmente projetada, para o diâmetro mais usual, não atendeu às expectativas, sendo necessário fixar a extremidade superior, propõe-se aqui a fixação utilizando uma bucha de cobre fixo em estrutura independente à turbina.

Sugestão para trabalhos futuros seriam:

- Dimensionar a estrutura de fixação superior do eixo de rotação.
- Para melhor certeza da escolha da turbina propõe-se realizar uma análise financeira para previsão do tempo de retorno do investimento, sendo necessário o dimensionamento da estrutura de suporte treliçada da turbina e demais componentes necessários para conexão em rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – **NBR – 6123/1988** – Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento.

ACUNHA JUNIOR, I. C. ; ALMEIDA, J. A. **Análise do desempenho de um aerogerador de pequeno porte**. Rio Grande do Sul: FURG, 2006. 100 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Oceânica).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2005. 243 p

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em: 02 Abril 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico**, 2016. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Acesso em: 02 Abril 2016.

AL-BAHADLY, I. Building a Wind Turbine for Rural Home, **Energy for Sustainable Development**, n.13, p. 159-165, 2009.

AMARAL, Bianca Mesquita. **Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e Vazão Aplicados à Comercialização de Energia**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_1.PDF>. Acesso em: 08 Abril 2016.

BEER, F. P.; JOHNSTON E. R. **Resistência dos Materiais**. 3. Ed. São Paulo: McGraw Hill, 2012.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CAMELO, H. N. ; Santiago, P. H. M. ; Carvalho, P. C. ; PEREIRA, T. B. . **Métodos de Extrapolação de Velocidade do Vento para Regiões Litorâneas do Nordeste Brasileiro**. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia CBMET 2010, 2010, Bélem - PA. A Amazônia e o Clima Global, 2010.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Eólico. **CRESESB**, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php>. Acesso em: 03 Abril 2016.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **CEPEL**. Sistema de Compensação, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/app/index.php?section=com_content&cid=app_s_compensa&tid=3>. Acesso em: 18 Fev. 2016.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO RIO GRANDE DO NORTE. **COSERN**. Consumo Médio de Energia Elétrica em Mossoró Cresce 12,3% no Primeiro Semestre de 2013 , 2013. Disponível em: <<http://www.cosern.com.br/Noticias/Pages/consumo-médio-de-energiaelétrica-em-mossoró-cresce-12,3-norimeiro-semester-de-0130809-5827.aspx>>. Acesso em: 18 Fev. 2016.

DUTRA, R. et al. **Aerogeradores de Pequeno Porte: Percepção dos Produtores**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/app/download/MAPP%20Informe%20tecnico%2002.pdf>>. Acesso em: 18 Fev. 2016.

Dee, et al., 2011. **The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 137, n. 656, Part A, pp. 553-597.

ECOMONDO. Micro e mini eolico rilanciano i generatori ad asse verticale. **ECOMONDO**. 2011. Disponível em: < http://myecomondo.blogspot.com.br/2011_10_01_archive.html>. Acesso em: 19 Março 2016.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Statistics. **GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL**, 2016. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 10 Março 2016

GUPTA R., BISWAS A., Wind data analysis of Silchar (Assam, India) by Rayleigh's and Weibull methods, Journal of Mechanical Engineering Research, v.2, n.1 (2010) 10-24.

LYSEN, E. H. **Introduction to Wind Energy**. 2ª ed. Amersfoort: CWD - Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, 1983.

LOPES, T. M. F., and ALMEIDA J. A., 2003, " Análise de Dados da Velocidade do Vento e Potencial Eólico na Cidade do Rio Grande", Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, (CD-ROM).

MACEDO, Luiza Pinheiro de. **PROJETO MECÂNICO DE UM AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL PARA MICROGERAÇÃO EM AMBIENTES URBANOS**. 2015. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2ª Edição. ed. Massachusetts: John Wiley & Sons, 2009. 705 p.

MENET, J. L., **A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study**. Renewable Energy, vol. 29, pp. 1843-1862, 2004.

MENEZES, Ana Elisa da Silva. **Aproveitamento eólico para uma vila de pescadores**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ÔLO, C. D. V. **Projecto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida**. Lisboa: UNL/FCT, 2012. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

PEREIRA JR., Carlos Antonio da Rocha. **Análise comparativa entre aerogeradores de eixo horizontal e vertical de pequeno porte para as características de vento de Caraúbas.** 2015. TCC (Graduação) – Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Caraúbas, 2015.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica.** Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 368 p.

ROCHA, Rafael Vieira. **Simulação de aerogerador em uma bancada experimental.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Elementos de Máquinas de Shigley.** Projeto de Engenharia Mecânica, 7ª ed., 2005.

SKF. **Rolamentos de rolos cônicos.** Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/sphericalollerbearings/cylindrical-and-tapered-bore/index.html?designation=BS2-22052RS/VT143&unit=metricUnit>>. Acesso em: 12 Abril 2016.

SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; ARAÚJO, M.R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, n. 3, p. 289-309, 2005.

WHITE. F. M; **Fluid Mechanics**, Fourth ed.: McGraw-Hill, 1999.