

CARLOS ANTONIO DA ROCHA PEREIRA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AEROGERADORES DE EIXO HORIZONTAL
E VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO
DE CARAÚBAS**

CARAÚBAS - RN
2015

CARLOS ANTONIO DA ROCHA PEREIRA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AEROGERADORES DE EIXO HORIZONTAL
E 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 Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Msc. Rafael Luz Espindola–
UFERSA

CARAÚBAS - RN
2015

© Todos os direitos estão reservados à 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 nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 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.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Setorial Campus Caraúbas (BSCA)
Setor de Informação e Referência

P436a Pereira Júnior, Carlos Antônio da Rocha.

Análise comparativa entre aerogeradores de eixo horizontal e vertical de pequeno porte para as características de vento de Caraúbas / Carlos Antônio da Rocha Pereira Júnior -- Caraúbas, 2015.

33f.: il.

Orientador: Prof. Msc. Rafael Luz Espindola.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

1. Energia eólica. 2. Aerogerador. 3. Potencial da energia eólica.
I. Título.

RN/UFERSA/BSCA

CDD: 621.31216

Bibliotecário: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB-15/700

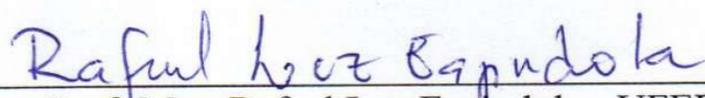
CARLOS ANTONIO DA ROCHA PEREIRA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AEROGERADORES DE EIXO HORIZONTAL
E VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO
DE CARAÚBAS**

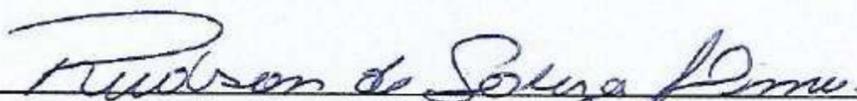
Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semiárido –
UFERSA, Campus Caraúbas para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

APROVADO EM: 07 / 12 / 2015

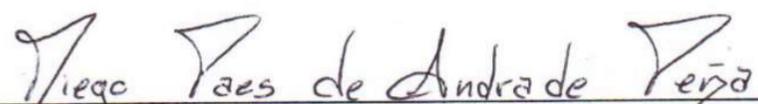
BANCA EXAMINADORA



Prof. Msc. Rafael Luz Espindola - UFRSA
Presidente



Prof. Msc. Rudson de Souza Lima - UFRSA
Primeiro Membro



Prof. Diego Paes de Andrade Peña - UFRSA
Segundo Membro

A Deus, aos meus pais e irmãos, que sempre acreditaram em mim, e que eu poderia vencer mais essa etapa na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e em seu filho Jesus Cristo por ter me salvado mesmo diante de minha insignificância e se doado em meu lugar, por estar sempre presente me fortalecendo e me orientando durante toda a minha vida. Tudo que tenho e que sou eu devo a ti.

Aos meus pais, Carlos e Suelda, que nunca mediram esforços para me ajudar, me dando amor, carinho e educação, e por me mostrar o verdadeiro significado de uma família. Tudo que conquistei e tudo o que vou conquistar será sempre dedicado a vocês.

Aos meus irmãos, Carlos Taffarel e Luzia Mycarla, por todos os momentos vivenciados. Vocês foram e sempre serão meus melhores amigos de toda a minha vida. Fazem parte de mim.

A todos os meus familiares, aos meus amigos que sempre me apoiaram, aos meus amigos da graduação, especialmente a Gabrielly Lucena e Igor Macedo por todas as noites de estudos, por todos os trabalhos realizados juntos e por todo apoio recebido de vocês. Sempre que lembrar da graduação lembrarei de vocês.

Ao meu orientador Rafael Luz Espindola por todo conhecimento, dedicação e disponibilidade para que esse trabalho fosse realizado, assim também como todos os conhecimentos passados durante as disciplinas as quais ministrou.

A todos os professores da UFERSA que contribuíram para a minha formação acadêmica.

RESUMO

No Brasil, a energia eólica apresenta um comportamento sazonal complementar à energia hidrelétrica, de forma que o período de maior potencial eólico no ano coincide com o período de menor capacidade nos reservatórios. Este trabalho tem como objetivo a análise comparativa de aerogeradores de pequeno porte para zonas urbanas. Com os parâmetros do vento da cidade de Caraúbas - RN fornecidos pelos CRESESB e com os tipos de turbinas selecionados, utilizou-se a função de densidade de probabilidade de Weibull e a curva de potência, para calcular a energia convertida e o fator de capacidade, o qual representa a relação entre energia convertida pelo aerogerador durante um intervalo de tempo e a energia máxima passível de conversão para o mesmo intervalo. Foi concluído que para as características do vento local a máquina mais indicada foi a turbina USA Solar, pois apresentou uma capacidade de produção anual de energia de 35.398 kWh e um maior fator de capacidade de 81% para as condições analisadas.

Palavras-chave: Aerogerador. Energia Eólica. Potencial Eólico.

ABSTRACT

In Brazil, wind power presents a complementary seasonal behavior to hydropower. It means that the period of greatest wind potential in the year coincides with the period of lower capacity in the reservoirs. This study aims to analyze a small wind turbine for urban areas. According to the parameters at Caraúbas - RN city wind provided by CRESESB, and the selected types of turbines, it was used the Weibull density probability function, and the power curve to calculate the converted energy, and capacity factor, which represents the ratio of converted energy by the maximum converted energy for a turbine at the same time interval. It was concluded for local wind characteristics that the most suitable machine was the USA Solar turbine, as it showed a power energy production of 35,398 kWh and a higher capacity factor of 81% to analyzed conditions.

Key words: Wind turbine. Wind energy. Wind power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Capacidade de energia eólica instalada cumulativa.....	2
Figura 2: Primeiro moinho de vento a gerar eletricidade.....	6
Figura 3: Turbina eólica de Brush.....	6
Figura 4: Aerogerador tipo Darrieus.....	8
Figura 5: Esquema do princípio de funcionamento do rotor Savonius.....	8
Figura 6: Aerogerador eólica tipo Savonius.....	9
Figura 7: Sistemas de turbina upwind e downwind.....	10
Figura 8: Componentes e estrutura esquematizada de um aerogerador de pequeno porte.....	11
Figura 9: Perfil vertical da velocidade do vento.....	12
Figura 10: Fluxo de ar através de uma área transversal A.....	14
Figura 11: Mapa dos ventos do Brasil.....	16
Figura 12: Mapa dos ventos do Rio Grande do Norte.....	16
Figura 13: Linhas de corrente que passam pelo rotor e velocidade e pressão.....	17
Figura 14: Fluxograma de representação da metodologia.....	20
Figura 15: Localização dos pontos utilizados nesse estudo.....	21
Figura 16: Distribuição de frequência de Weibull.....	22
Figura 17: Potência das máquinas para determinadas velocidades.....	23
Figura 18: Produção anual de energia - PAE.....	24
Figura 19: Geração trimestral de energia.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de aerogeradores e dimensionamento típico	12
Tabela 2: Parâmetros de Weibull: fator de forma e escala	23
Tabela 3: Distribuição de frequência de Weibull	24
Tabela 4: Características das máquinas horizontais selecionadas	24
Tabela 5: Características das máquinas verticais selecionadas	25
Tabela 6: Potência das máquinas para determinadas velocidades	25
Tabela 7: Produção de energia das máquinas para determinadas velocidades	27
Tabela 8: Determinação do fator de capacidade	27
Tabela 9: Consumo e número de consumidores do RN	29

SUMÁRIO

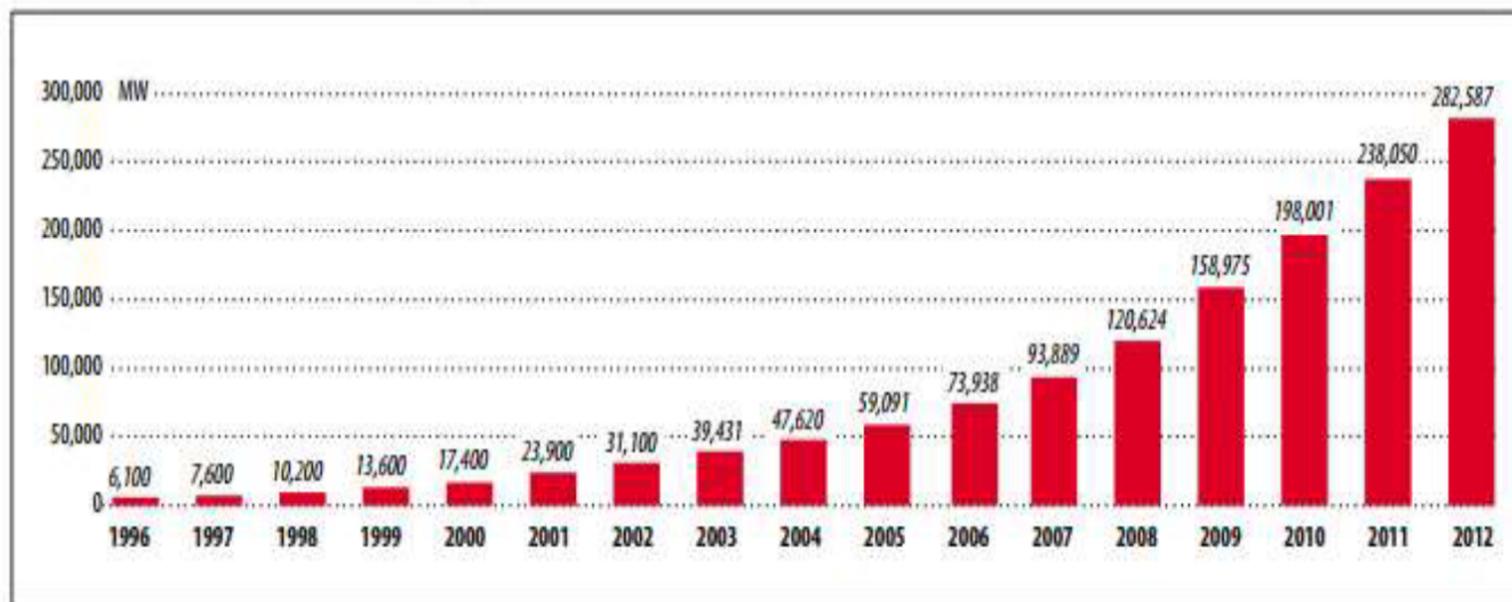
1 INTRODUÇÃO.....	2
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVO GERAL	4
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Histórico	5
2.1.1 Os Primeiros Geradores Eólicos.....	5
2.2 Tipos de Aerogeradores	7
2.2.1 Aerogeradores de Eixo Vertical.....	7
2.2.2 Aerogeradores de Eixo Horizontal.....	9
2.3 Classificação dos Aerogeradores.....	11
2.4 Características do Vento.....	11
2.2.2 Função de Densidade de Probabilidade.....	12
2.2.3 Determinação do Potencial Eólico.....	13
2.2.4 Determinação da Produção Anual de Energia de um Aerogerador.....	15
2.5 Mapas Eólicos	15
2.6 Modelo do Disco Atuador	15
2.7 Solidez	18
2.9 Limite de Bertz.....	19
3 METODOLOGIA.....	20
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	21
4.1. Determinação dos Parâmetros de Weibull	21
4.3 Distribuição de Frequência de Weibull	22
4.4 Seleção de Turbinas Comerciais e Potência Produzida	22
4.5 Produção Anual de Energia (PAE).....	23
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	27
6 REFERÊNCIAS.....	28
APÊNDICE.....	31

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se intensificado a busca por novas tecnologias que possibilitem a utilização de fontes de energias renováveis. Alguns motivos para isso são: a minimização da poluição ambiental oriunda das fontes poluentes de energia; diversificação da matriz energética; e ainda para promover uma maior segurança energética em povoados e sítios afastados de grandes centros urbanos.

No verão brasileiro de 2014, a ocorrência de chuvas abaixo do esperado reduziu de forma significativa o nível dos reservatórios das usinas hidroelétricas, o que levou ao uso intenso das usinas termoeletricas para atender a demanda de eletricidade (G1, 2015). Tal fato evidenciou a urgência de maior diversificação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica do país, que ainda é muito dependente da hidroelétrica. No cenário energético global, os investimentos em energia eólica vêm ganhando espaço, principalmente pela boa experiência ocorrida em países como Dinamarca e Alemanha (Pinto, 2013). Segundo o Global Wind Energy Council– GWEC (2013), em 2013 a capacidade de energia eólica instalada passou de 6.100 MW para 282.587 MW entre os anos de 1996 e 2012, conforme a Fig. 1.

Figura 1: Capacidade de energia eólica instalada cumulativa.



Fonte: GWEC, 2013.

Em 1990, a capacidade de energia eólica instalada no mundo era inferior a 2.000MW (ANEEL, 2005). Em 2012, essa capacidade era de 282.587 MW, tendo destaque à China, que possui 26,7% da energia eólica instalada mundial. Além da China, os Estados Unidos, Alemanha, Espanha, Índia, Reino Unido, Itália, França, Canadá e Portugal são os dez países que mais geram energia através da fonte eólica, tendo ao todo 85,9% da capacidade mundial (GWEC, 2013).

Atualmente, a energia eólica representa 4,5% da matriz energética do Brasil, com 241 usinas instaladas gerando pouco mais de 6 GW. O Brasil tem aumentado sua produção de energia eólica de maneira constante. Em 2013 foram contratados 4,7 GW de projetos eólicos, e em 2014 foram 2,3 GW, todos a serem implantados até 2019 onde a capacidade eólica brasileira deverá atingir 15,2 GW (ABEÓLICA, 2015).

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CRESESB, 2001), ainda existe um imenso potencial de energia eólica não explorado. Análise dos dados de ventos no Nordeste aponta como características da região, velocidades médias de ventos altas, poucas variações nas direções do vento e pouca turbulência durante o ano todo (SANTOS, 2006), características que justificam os atuais investimentos de empresas geradoras na região.

Os aerogeradores são classificados de acordo com a posição do eixo do rotor onde podem ser de eixo vertical ou horizontal, e também com relação a potência produzida, que variam de micro, mini, médio e de grande porte. Os aerogeradores mais indicados para a zona urbana são os de pequeno porte por ocuparem uma área pequena em comparação os de grande porte, e por sua característica de produção própria, que se torna uma grande vantagem por evitar as perdas que aconteceriam em transmissões à longas distâncias.

Este trabalho trata-se de um estudo comparativo entre o desempenho de aerogeradores de pequeno porte de eixos horizontal e vertical, para as características de vento de zonas urbanas em cidades de pequeno porte, no interior do Nordeste, utilizando como metodologia uma análise comparativa da potência convertida em função da velocidade do vento e do potencial eólico. A cidade de Caraúbas no estado do Rio Grande do Norte foi utilizada para o estudo de caso.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil está vivendo um momento de seca sem precedentes. A escassez da água tem contribuído para a elevação do preço da energia elétrica, onde segundo a AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL, 2013) cerca de 80% da produção brasileira é oriunda de hidroelétricas. Assim, cada vez mais desperta-se para a importância de se obter novas fontes de geração de energia, como também o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a utilização dessas novas fontes.

O ar em movimento possui energia, e a energia obtida do vento é uma das fontes naturais mais simples utilizada na Terra, onde a mesma foi utilizada por muito tempo para mover embarcações, bombear água, dentre outros exemplos. Utilizar-se da conversão deste

tipo de energia em energia elétrica através de turbinas eólicas é de grande interesse, uma vez que existe uma complementaridade entre os ventos e as chuvas no Brasil (BORGES, 2012), e a atual seca enfrentada pelo país vem gerando uma crise na matriz energética. Tudo isso qualifica e incentiva o estudo de viabilidade de instalação de aerogeradores eólicos no Brasil.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre aerogeradores comerciais de pequeno porte no interior do Nordeste, tomando como referência a cidade de Caraúbas - RN.

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Verificar a média anual de velocidade, através de mapa eólico brasileiro;
- Estimar os parâmetros de Weibull para a cidade de Caraúbas;
- Estimar a distribuição de frequência de Weibull;
- Selecionar modelos de turbinas comerciais de eixo horizontal e vertical para calcular a potência para cada velocidade comparando os tipos de turbina;
- Estimar a produção de energia (PE) para cada velocidade e obter a produção anual de energia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

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

2.1 Histórico

Não é clara a data de origem de um dispositivo identificado como eólico, havendo especulações contraditórias sobre a origem histórica dos moinhos de vento (PINTO, 2013). Alguns autores acreditam que foram os egípcios os primeiros 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.

Em meados de 700 d.C., os persas construíram os primeiros moinhos de vento vertical elevados para serem usados como força nas mós, e na moagem de grãos. Os muçumanos também contribuíram para o desenvolvimento do moinho de vento, e alguns historiadores mencionam que foram os muçumanos que levaram a ideia e desenhos de moinhos de vento para a Europa na época das cruzadas. Já outros acreditam que foram os holandeses que levaram tal tecnologia para a Europa, os mesmos holandeses que desenvolveram o moinho de vento horizontal, com pás, comuns nos campos holandeses e ingleses.

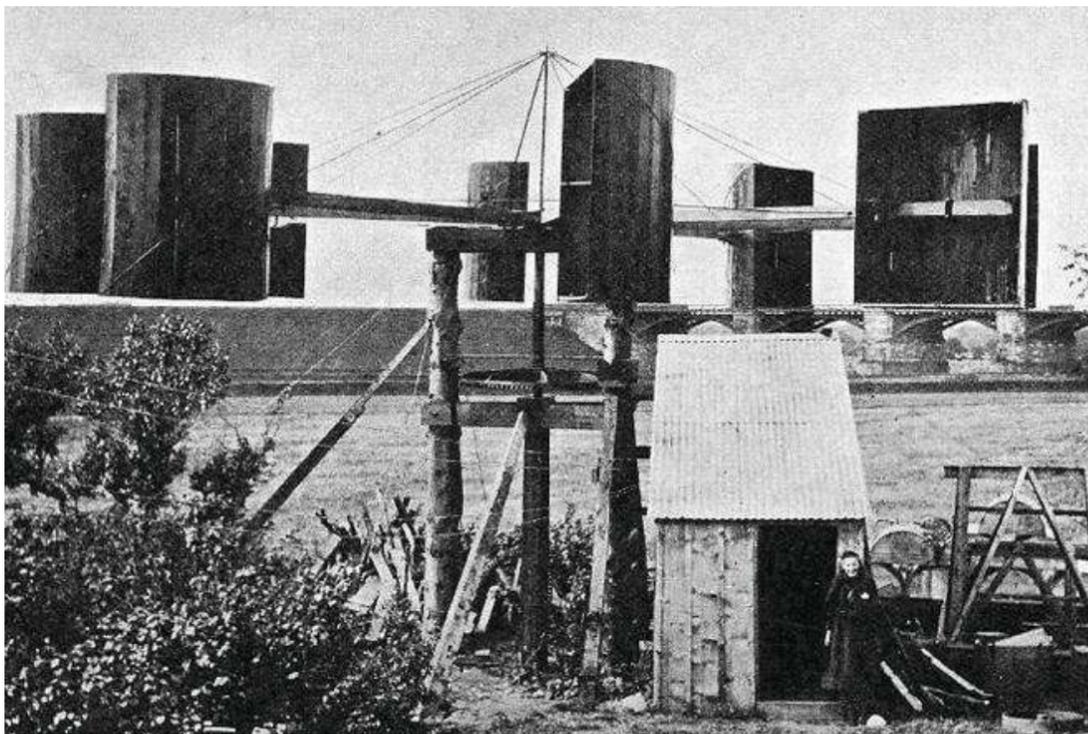
Em 1850, Daniel Halliday desenvolveu o famoso moinho de vento americano de fazenda, composto por múltiplas pás, utilizado principalmente para bombear água, muito comum nas zonas rurais em fazenda de gados, mais conhecido popularmente como cata-ventos.

2.1.1 Os Primeiros Geradores Eólicos

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 máquina de Blyth tinha 10 m de altura e eixo vertical, e foi instalada em sua casa de campo. Ela era usada para

alimentar a iluminação da casa, que se tornou a primeira do mundo a ter eletricidade fornecida por energia eólica. A Fig. 2 mostra o equipamento desenvolvido por Blyth.

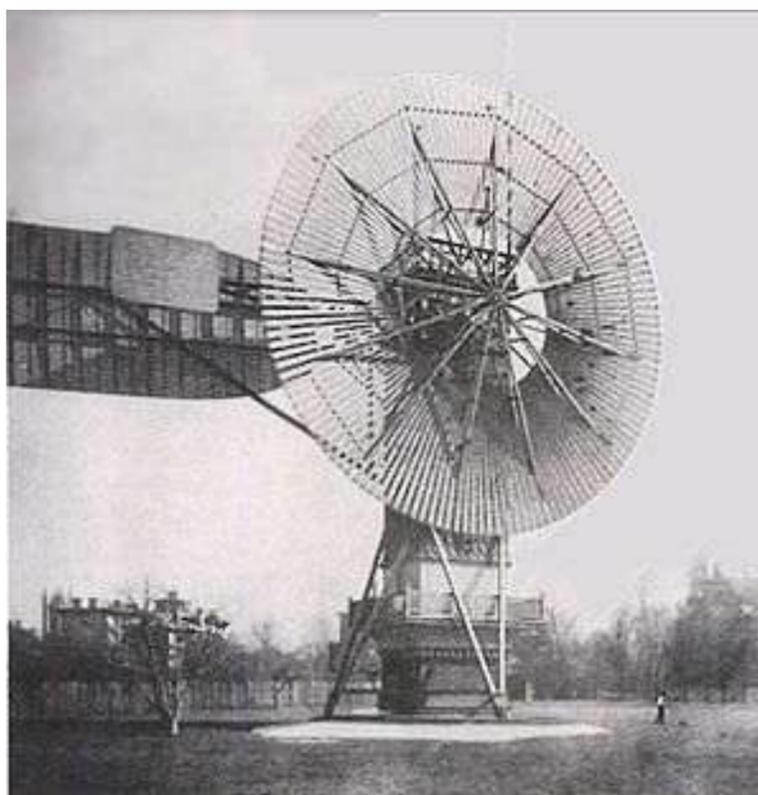
Figura 2: Primeiro moinho de vento a gerar eletricidade



Fonte: Adaptado de Pinto (2013).

Em 1888 foi construído por Charles Brush, em Cleveland-Ohio, um serogerador de eixo horizontal maior que a máquina de Blyth. Consistia-se em 144 pás, tinha quase 17 m de diâmetro de rotor e 18,3 m de altura da torre como mostra a Fig. 3. Por causa dessa invenção costuma-se erroneamente atribuir o título de inventor da energia eólica a Charles Francis Brush.

Figura 3: Turbina eólica de Brush.



Fonte: Adaptado de Pinto (2013).

No século XIX, Poul La Cour marca o ponto de transição entre os moinhos de ventos e a moderna tecnologia de geração eólica. Ele é considerado o pioneiro da geração de eletricidade por meio do vento (PINTO, 2013). Desde então a tecnologia de geração de energia eólica vem sendo aperfeiçoada, até os nossos aerogeradores atuais.

2.2 Tipos de Aerogeradores

Os aerogeradores podem ser diferenciados conforme a posição do eixo do rotor, podendo ser de eixo horizontal e eixo vertical. Veremos a seguir as peculiaridades de cada tipo.

2.2.1 Aerogeradores de Eixo Vertical

O primeiro moinho desenvolvido com a finalidade de se obter energia era de eixo vertical. Uma das vantagens do aerogerador vertical é que não necessita de sistemas de orientação em relação à direção do vento incidente (CRESESB, 2006). Possui maior facilidade de instalação e de manutenção, o que geralmente o torna mais barato. A maior desvantagem é que o aerogerador vertical atua em alturas mais baixas próximo ao solo, onde o vento tem características de fluxo turbulento, obrigando-os a operar em menores frequências reduzindo a sua eficiência de extração energética.

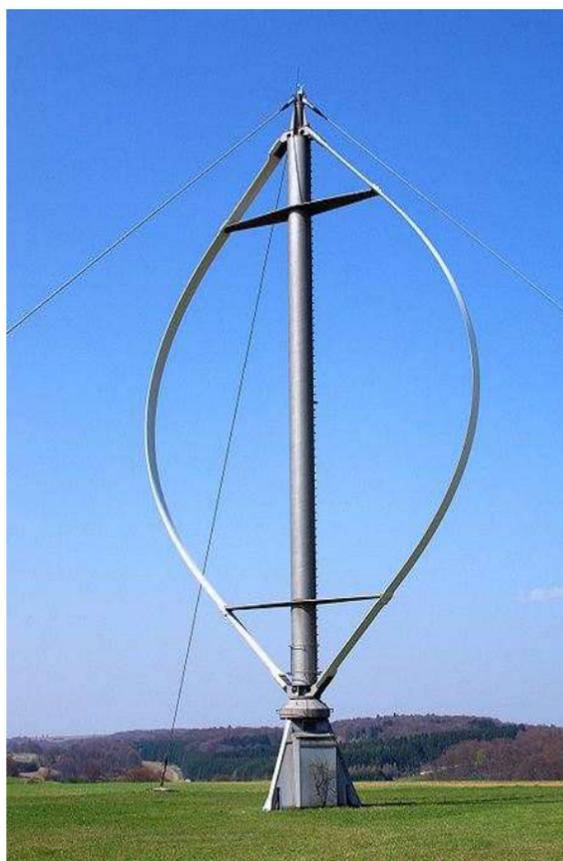
Os aerogeradores verticais podem ser movidos por força de sustentação e por força de arrasto, onde os principais tipos são, respectivamente, o Darrieus e Savonius.

2.2.1.1 Aerogerador Vertical Tipo Darrieus

Foi desenvolvido pelo engenheiro francês George J. M. Darrieus em 1927, e é geralmente constituído por duas ou três pás em forma de arco, sendo movido por força de sustentação. Apesar de ser uma turbina com boa eficiência, ela é considerada uma turbina de baixa confiabilidade por causa das oscilações de torque e de estresse cíclico na torre (AMARAL, 2011). A turbina Darrieus apresenta duas vantagens principais. Uma delas é que essas turbinas têm seu equipamento montado no chão, facilitando tanto no momento da instalação quanto na manutenção. A segunda vantagem é que as Darrieus, assim como a maioria dos aerogeradores verticais, não necessitam de mecanismos de orientação em relação à direção do vento. Apresentam uma desvantagem em possuir um torque de partida muito

baixo, necessitando de uma fonte de alimentação externa. Comumente são sustentadas por cabos como ilustra a Fig. 4.

Figura 4: Aerogerador tipo Darrieus.

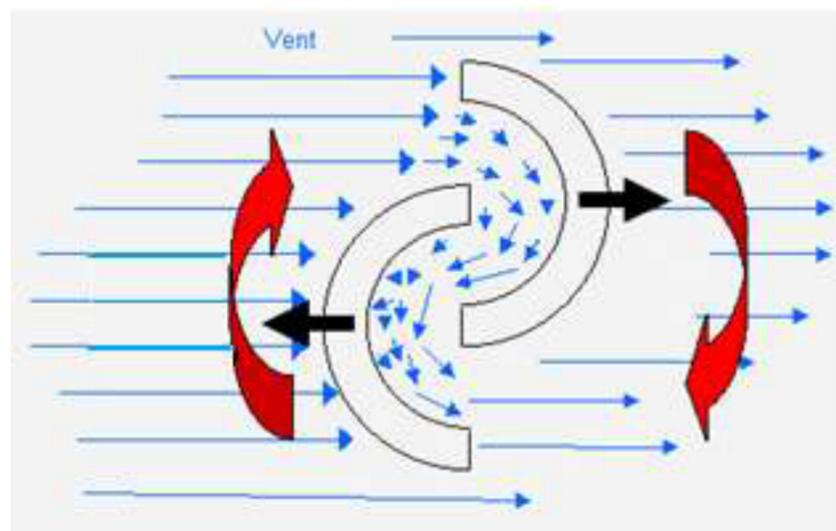


Fonte: Adaptado de CRESESB (2001).

2.2.1.2 Aerogerador Vertical Tipo Savonius

Construída na década de 30 pelo engenheiro Sigrid Savonius na Finlândia, baseia-se no princípio do acionamento diferencial. Nela, os ventos incidem nas faces do corpo oco em intensidades diferentes que resulta no movimento rotativo do rotor. Movimento ilustrado na Fig. 5.

Figura 5: Esquema do princípio de funcionamento do rotor Savonius.



Fonte: Adapto de CRESESB (2001).

O rotor tipo Savonius é um dos mais simples. Apresenta torque de partida, descartando a necessidade de uma fonte de alimentação externa, é movido principalmente pela força de arrasto. Porém, apresenta desvantagens por possuir baixas velocidades de rotação, o que reduz o rendimento a cerca de 15% de eficiência (AMARAL, 2011). Tem pás em forma de conchas e podem ser utilizados também em anemômetros e sistemas de ventilação, como o ventilador Flettner, bastante utilizado em tetos de vans e ônibus. A Fig. 6 mostra um exemplo de aerogerador Savonius.

Figura 6: Aerogerador eólica tipo Savonius.



Fonte: Eólica fácil (2015).

2.2.2 Aerogeradores de Eixo Horizontal

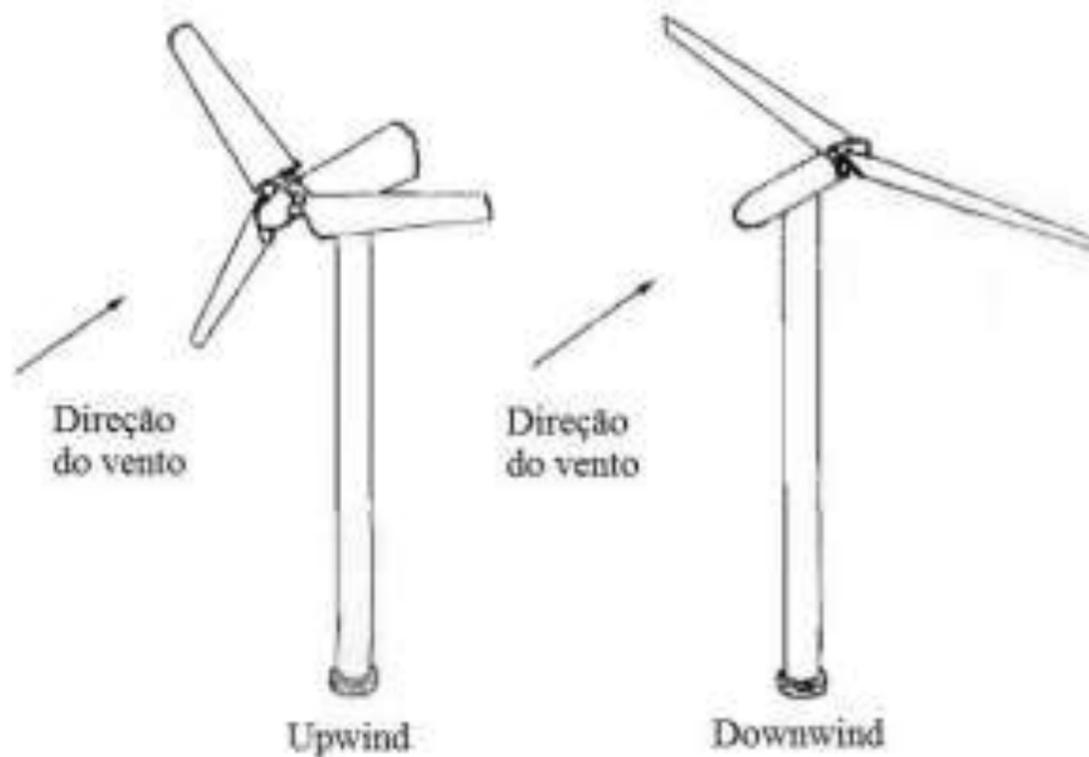
Os rotores de eixo horizontal são os mais utilizados mundialmente (CRESESB, 2006). Apesar de ser mais caro que os de eixo vertical, os do tipo horizontal apresentam maior rendimento e eficiência. Necessitam de sensores de orientação, com relação à direção incidente do vento e de mecanismos para girar o rotor e mantê-lo de frente para o vento, extraindo o máximo de energia possível.

Este tipo de turbina tem uma torre em torno de 80 a 100 metros, ficando seus componentes no topo da torre a fim de se obter a altura ideal para coletar a velocidade do vento. Sua base, ao contrário das de eixo verticais ocupam muito pouco espaço no solo.

Pode ser composto por uma, duas, três, quatro ou até mesmo múltiplas pás. Porém a mais utilizada é a turbina com três pás por ser mais estável. Além disso, o uso de três pás produz uma melhor relação de potência extraída por área de varredura do rotor para velocidades mais elevadas (AMARAL, 2011).

As turbinas deste tipo são classificadas também quanto à posição do rotor em relação à torre. Podem ser downwind, quando as pás se encontram por trás da nacela da turbina eólica. Nesse caso, as pás possuem uma inclinação de maneira que não se faz necessário dispositivo de direcionamento do vento, contudo exige maior flexibilidade do rotor, gerando ruídos desconfortáveis que atrapalham a aceitação dessa turbina. Elas podem ser também classificadas como upwind, quando o rotor eólico se encontra à frente da nacela. Nesse caso, as rajadas de vento incidem primeiro no rotor, sendo necessário o uso de sistemas de direcionamento do rotor ao vento. O rotor upwind é o mais comum. Esquema de downwind e upwind é mostrado na Fig. 7.

Figura 7: Sistemas de turbina upwind e downwind.



Fonte: Fleck (2012).

2.3 Classificação dos Aerogeradores

A literatura distingue os aerogeradores de acordo com a classificação apresentada na Tabela 1.

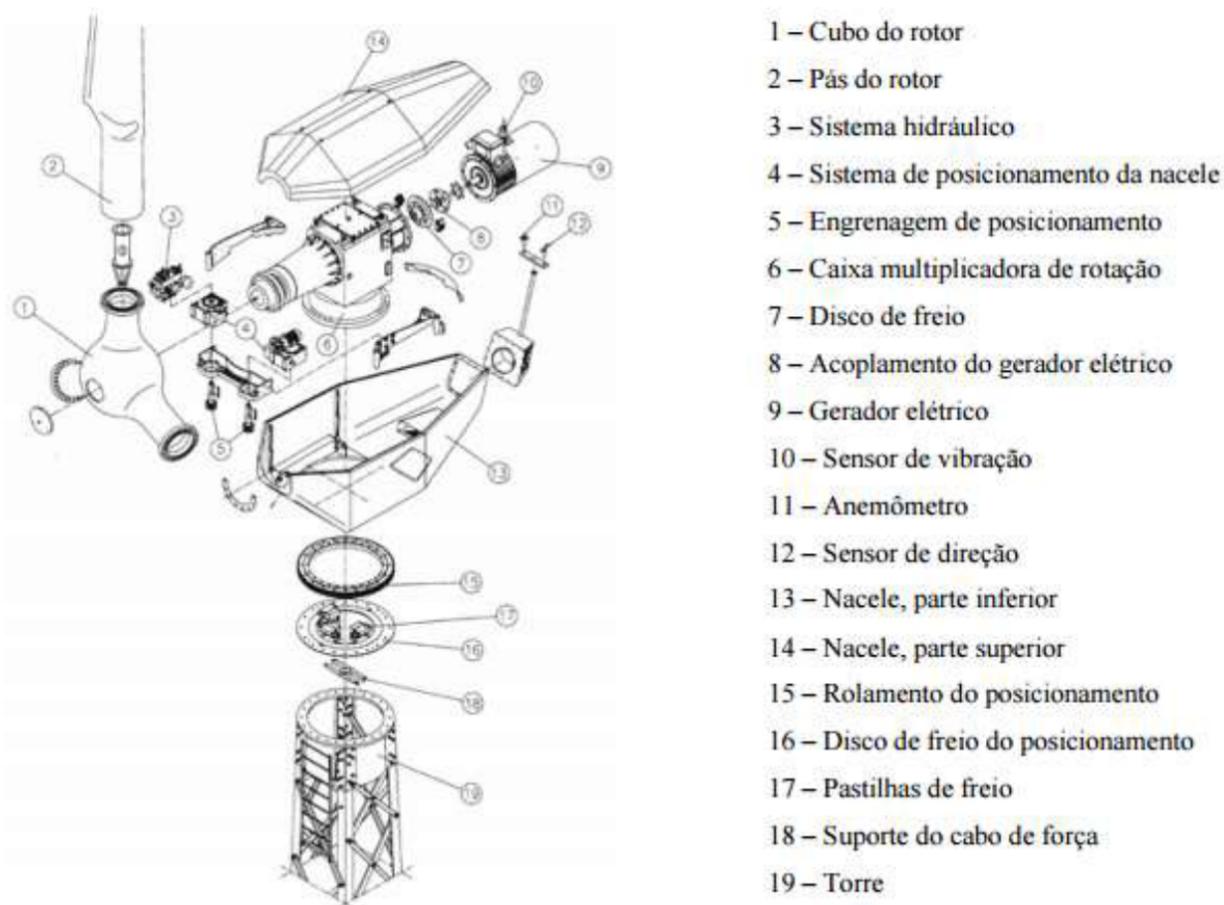
Tabela 1: Classificação de aerogeradores e dimensionamento típico.

Classe	Potência (kW)	Massa (kg)	Diâmetro do rotor (m)	Altura do cubo do rotor (m)
Aerogerador industrial	>500	>40000	>45	>50
Aerogerador pequeno	<500	<40000	<45	<50
Aerogerador médio	<100	<9000	<20	<35
Mini-aerogerador	<30	<1000	<15	<25
Micro-aerogerador	<1	<50	<3	<10

Fonte: LEHMANN e KOENEMANN (2005).

A energia elétrica produzida por um aerogerador pode ser armazenada em baterias, ser transportada através de linhas de produção, ou podem ser transformadas nas formas de energia necessitadas no local (LUTZ, 2006). A Fig. 8 mostra a estrutura e os componentes individuais de uma turbina de pequeno porte.

Figura 8: Componentes e estrutura esquematizada de um aerogerador de pequeno porte.



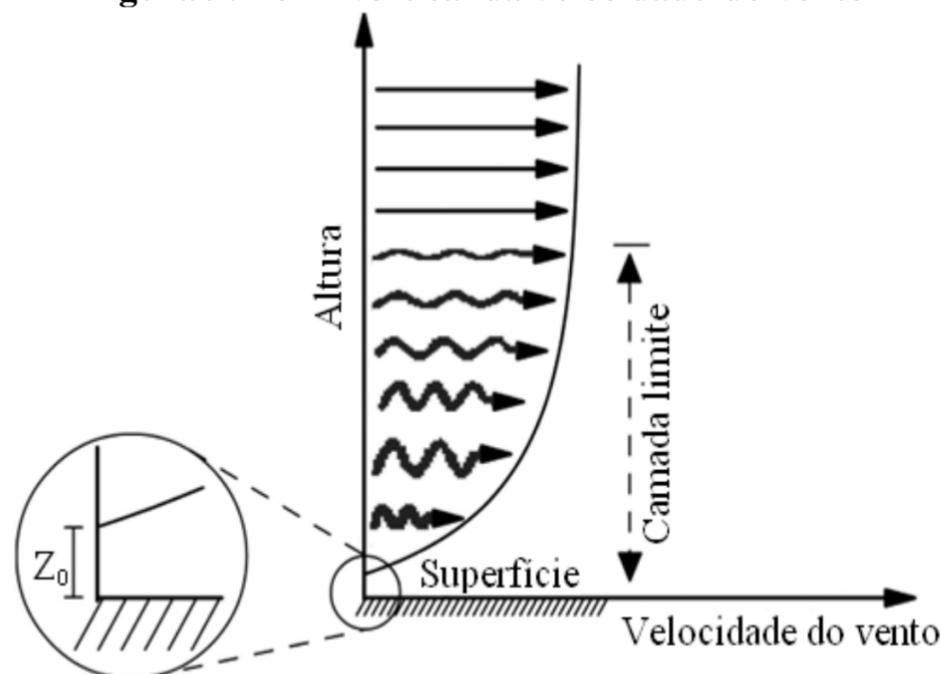
Fonte: Adaptado de CRESESB (2003).

2.4 Características do Vento

A camada limite planetária, conhecida como camada limite superficial, estende-se desde o solo até aproximadamente 100 a 120 m, podendo ser alterada de acordo com as

diferentes rugosidades do terreno. “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 Fig. 9 mostra a variação da velocidade do vento dentro da camada limite superficial em função da altura, ou seja, o perfil de velocidades.

Figura 9: Perfil vertical da velocidade do vento



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

Entender o perfil de velocidade do vento nas proximidades do solo é de suma importância, não só para a geração de energia eólica, mas para diversas outras atividades como decolagem e pouso de aeronaves entre outras atividades.

Nas regiões urbanas as velocidades dos ventos são perturbadas devido a edificações como: casas, prédios e torres, dentre outros, e com essas perturbações os ventos tendem a ter menores velocidades e maiores turbulências. A grande vantagem de se produzir energia no local onde é utilizado, é que as perdas são insignificantes em relação ao transporte. Outro fator importante é que no topo dos prédios e até ao redor dos mesmos é possível encontrar velocidades de vento até 20% maiores que as não perturbadas, porém com alta intensidade de turbulência (MERTENS, 2002).

2.2.2 Função de Densidade de Probabilidade

A curva que descreve a frequência de ocorrência das velocidades do vento pode ser obtida por diversas funções de densidade, contudo a mais utilizada é a função de densidade de probabilidade de Weibull, Eq. 1 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001). A função possui duas variáveis: c que é o parâmetro de escala, e pode ser obtido pela Eq. 2 (LYSEN, 1983), dado em unidade de velocidade, e k o parâmetro de forma definido pela Eq. 3 (GUPTA, 2010).

Contudo, o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESEB (2001) fornece os valores de c e k para toda a extensão do território nacional a partir da posição 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.

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

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad [m/s] \quad (2)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{U}}\right)^{-1,086} \quad (3)$$

Onde V é a velocidade do vento, Γ é a função gama, σ é o desvio padrão dos dados de vento de uma amostra e \bar{U} é a velocidade do vento média da amostra.

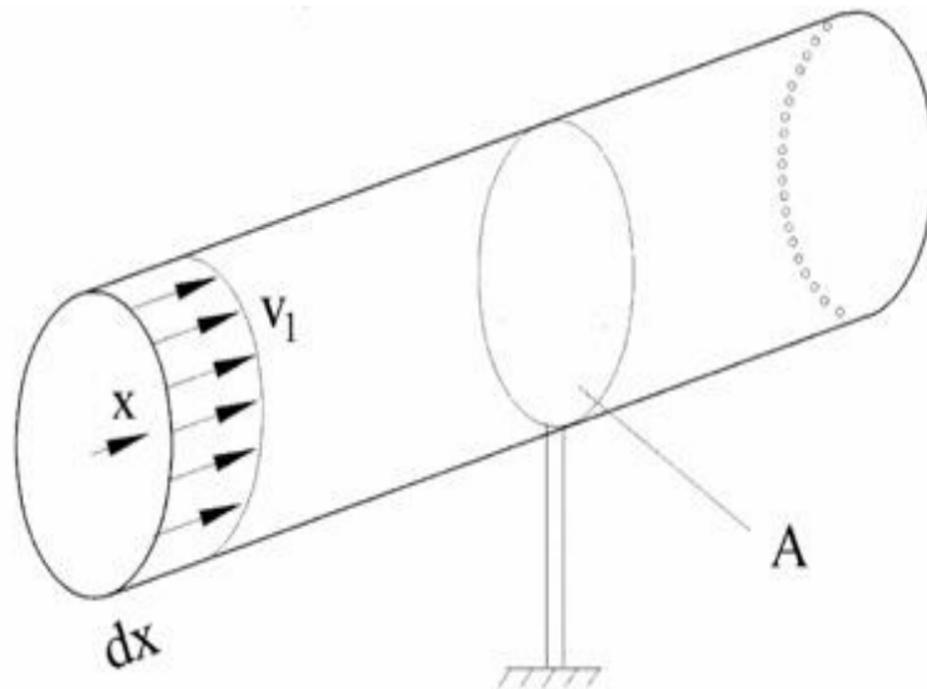
A densidade de probabilidade pode ser obtida também através da função de Rayleigh, expressa pela Eq. 4. Ela baseia-se em uma forma simplificada da Distribuição de Weibull, usando $k = 2$. Esta equação é de uso limitado, por utilizar apenas a velocidade média, o que a torna imprecisa para essa aplicação, principalmente em condições em que a velocidade do vento são altas (MACEDO, 2002 *apud* ACUNHA *et al.*, 2006).

$$f(V) = 2 \frac{V}{c^2} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right] \quad (4)$$

2.2.3 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 e SILVA, 2003). A Fig. 10 mostra uma ilustração da massa de ar que passa pela seção transversal de varredura de um aerogerador. Esse seria o a massa de ar da qual se poderia extrair a energia e convertê-la em energia mecânica pela turbina do aerogerador.

Figura 10: Fluxo de ar através de uma área transversal A



Fonte: CRESESB (2008).

Considerando que toda a massa de ar que passa na seção transversal de varredura das pás, seja simbolizada por m , a energia cinética de um corpo é representada pela Eq. 5:

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (5)$$

A vazão em massa de ar, \dot{m} , dada em kg/s pode ser então determinada através da Eq. 6, onde ρ é a massa específica do ar, V é a velocidade do vento e A corresponde a área de varredura das pás do aerogerador.

$$\dot{m} = \rho AV \quad (6)$$

Dessa maneira o potencial eólico, dado pela energia por unidade de tempo numa massa de ar, pode ser escrito conforme Eq. 7.

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (7)$$

Podemos obter assim, a densidade de potência ou fluxo de potência dividindo a Eq. 7 pela área, como está expresso pela Eq. 8 (CRESESB, 2008):

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho V^3 \quad (8)$$

2.2.4 Determinação da Produção Anual de Energia 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 PAE de um aerogerador pela soma do produto da potência que a máquina consegue extrair do vento a uma determinada velocidade, pela quantidade do número de horas que determinada velocidade ocorre no local, de acordo com a função de Weibull (Eq. 9).

$$PAE = \frac{\sum P(V) \times f(V) \times 8760}{1000} [MWh] \quad (9)$$

2.5 Mapas Eólicos

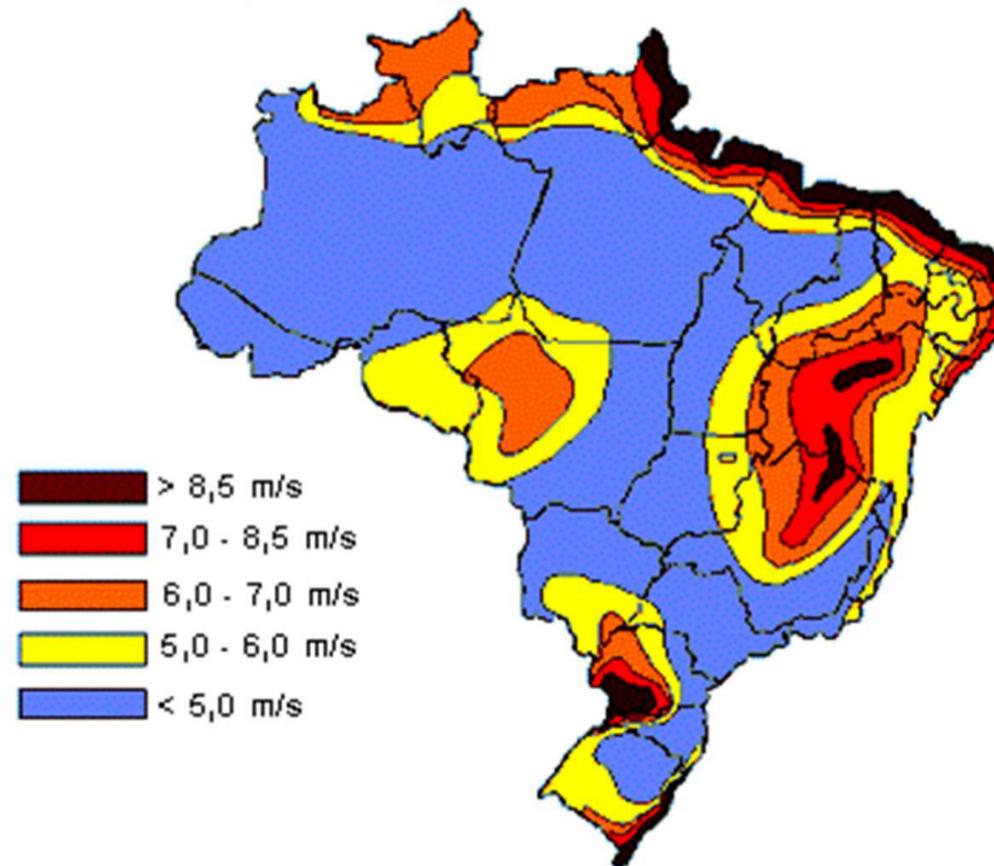
A disponibilidade de dados confiáveis e representativos é muito importante na tomada de decisão para empreendimentos eólicos, principalmente para o Brasil, que apresenta grande potencial e ainda não explora esse recurso de forma expressiva. Diante desse cenário foi desenvolvido o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, onde são observadas as principais variáveis que influenciam o processo de geração de energia eólica. Os resultados destas simulações são expressos em mapas temáticos, que apresentam o regime médio de vento (velocidades, direções predominantes e parâmetros estatísticos de Weibull) e fluxos de potência eólica na altura de 50m, na resolução horizontal de 1km x 1km, para todo o país (CRESESB, 2001). A Fig. 11 mostra o mapa eólico do Brasil, destacando a velocidade média dos ventos, e a Fig. 12, o mapa eólico da região do Rio Grande do Norte também em relação à velocidade média dos ventos.

2.6 Modelo do Disco Atuador

O modelo do disco do atuador possibilita estimar a quantidade de energia que será extraído do vento por um aerogerador. “Desta forma faz-se necessário a modelagem da rotação da turbina e de sua esteira, onde o torque desenvolvido pelo rotor deve ocasionar uma taxa igual à variação do momento angular do vento, induzindo uma velocidade tangencial a rotação do motor” (LEMOS, 2005).

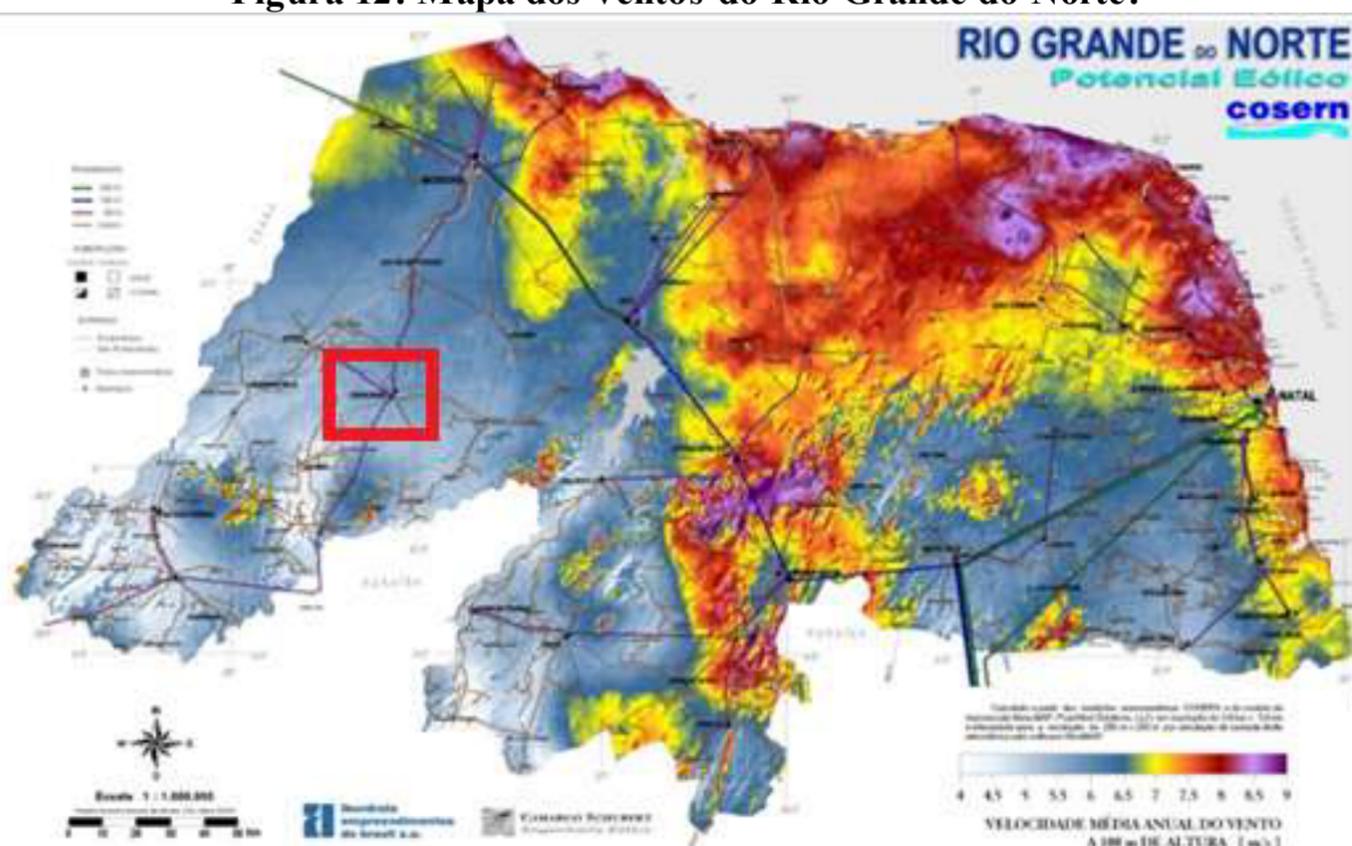
O modelo mais simples utilizado para a descrição do comportamento de uma turbina eólica é baseado na teoria do disco atuador.

Figura 11: Mapa dos ventos do Brasil.



Fonte: CRESESB (2001).

Figura 12: Mapa dos ventos do Rio Grande do Norte.



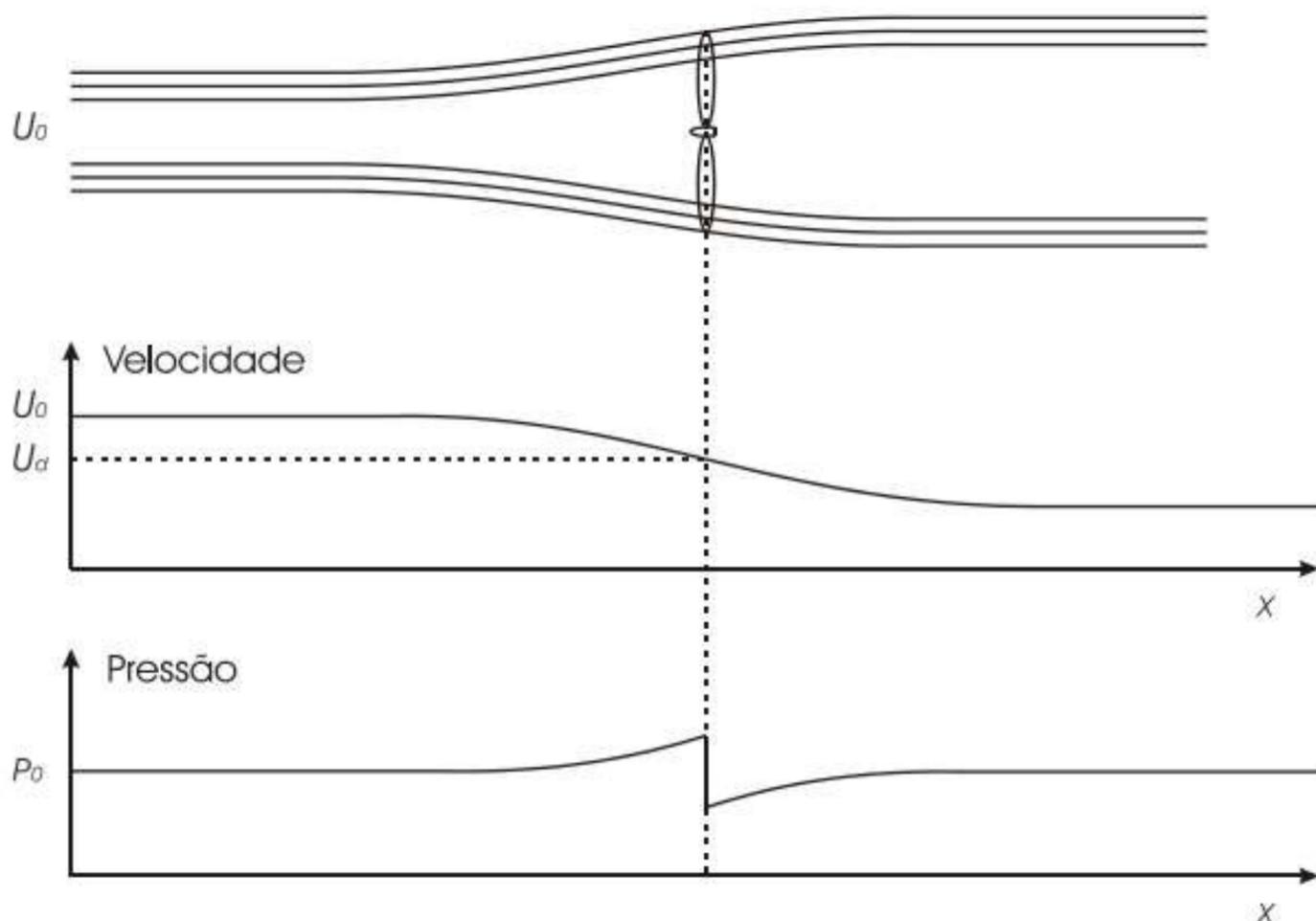
Fonte: CRESESB (2001).

Considerando um rotor como um disco, de diâmetro igual ao do rotor, que permite a passagem de ar sem atrito, com um número infinito de pás na turbina, e que o ar fora do

volume de controle não é afetado pela turbina como ilustra a Fig. 13, A vazão mássica de ar é calculada como $\rho A_s U$, onde ρ é a massa específica do ar, A_s é a área do disco e U é a velocidade do ar. De acordo com a equação da continuidade, tem-se a Eq. 10:

$$\rho A_0 U_0 = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (10)$$

Figura 13: Linhas de corrente que passam pelo rotor e velocidade e pressão.



Fonte: LEMOS (2006).

De acordo com a teoria do disco do rotor, a velocidade do vento U_d é relacionada com a velocidade do vento U_0 , de acordo com a Eq. 11.

$$U_d = (1 - a)U_0 \quad (11)$$

Onde a é o fator de indução da velocidade. Ele é o parâmetro que determina a redução da velocidade no rotor.

Aplicando o princípio de Bernoulli e considerando o fluxo de ar uniforme na seção transversal pode-se determinar a potência extraída do motor como sendo expresso pela Eq. 12.

$$P = 2\rho AU_0^3 a(1 - a) \quad (12)$$

De modo similar podemos obter a força de empuxo aerodinâmico que atua no rotor.

$$T = 2\rho AU_0^2 a(1 - a) \quad (13)$$

O coeficiente adimensional para a potência extraída pode ser expressa como:

$$Cp = \frac{2P}{\rho AU_0^3} = 4a(1 - a) \quad (14)$$

2.7 Solidez

A solidez é responsável por caracterizar o formato geométrico da pá. Seu conceito diz que é a razão entre a área total da pá e a área varrida pela pá. As pás descrevem a área circular varrida, A_v , que determina a potência do vento que é interceptada (PINTO, 2013). Contudo a área total das pás é bem maior que a área varrida e a relação entre essas duas pás é conhecida como solidez, S . Dessa maneira podemos expressar a solidez de acordo com a Eq. 15.

$$S = \frac{NA_p}{A_v} \quad (15)$$

Onde N é o número de pás e A_p é a área de cada pá. Sabendo que a potência depende apenas da área varrida, significa dizer que, aumentando a solidez, se aumenta o torque, porém diminui a rotação.

Resumidamente uma baixa solidez é igual à alta velocidade com baixo torque e alta solidez é igual à baixa velocidade e um alto torque.

2.9 Limite de Bertz

Retirar toda a energia disponível no vento significaria dizer que toda a energia cinética do vento foi extraída e conseqüentemente a velocidade do vento na saída do rotor seria nula. Assim, 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 Limite de Bertz indica o valor máximo do rendimento que o aerogerador pode atingir. O coeficiente de potência $C_{p,Bertz} = 0,593$ significa que somente 59,3% da potência disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica.

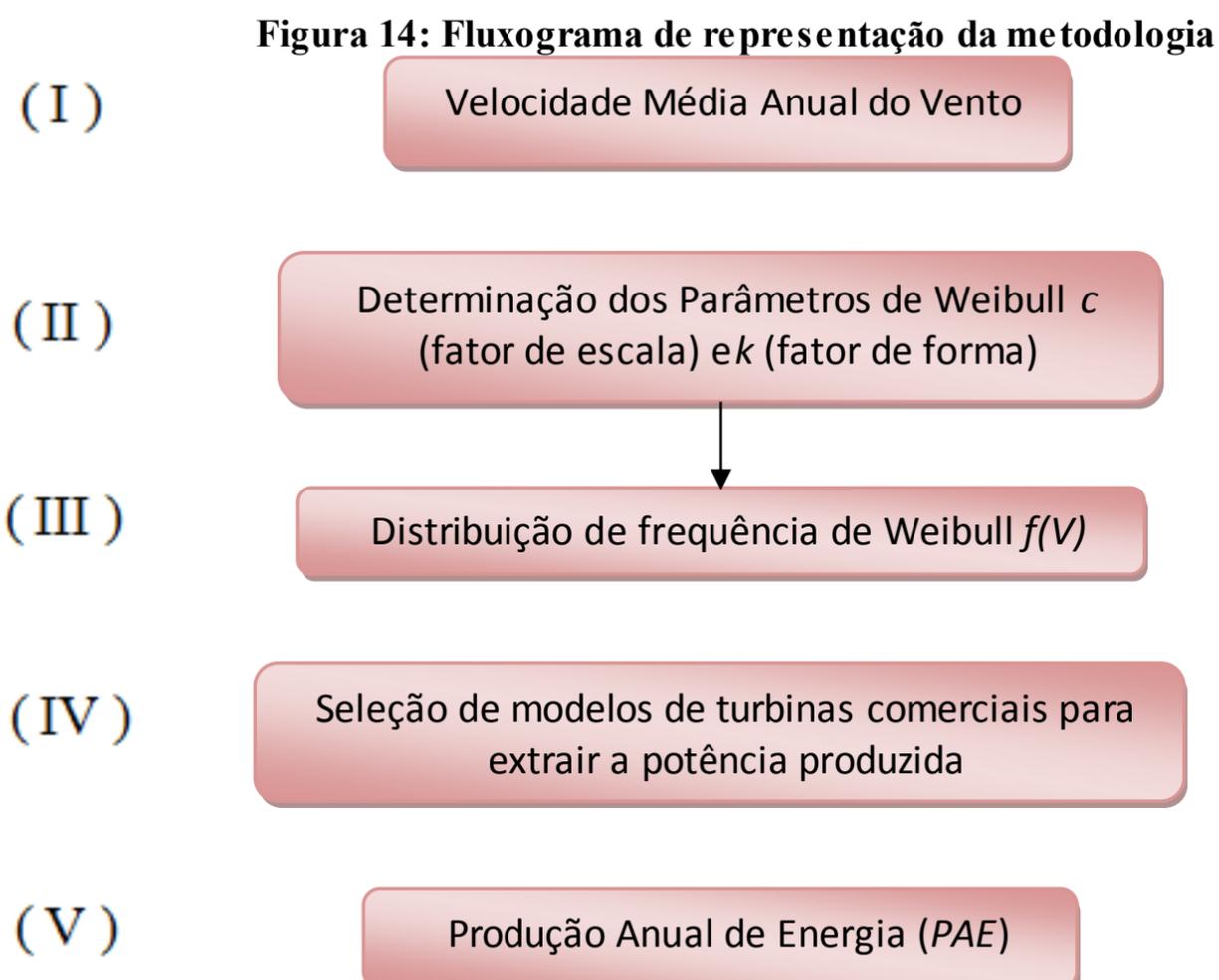
3 METODOLOGIA

A metodologia seguida neste trabalho baseia-se em uma síntese da proposta de Oliveira Filho (2011). Nela, (I) primeiramente verifica-se a média anual de vento para o local, através de um mapa eólico. (II) Em seguida, determina-se c de Weibull (fator de escala), através da Eq. 2 (LYSEN, 1983), ou obtém-se o disponibilizado pelo CRESESB (2001). De modo semelhante, estima-se o parâmetro de Weibull k (fator de forma) através da localização geográfica utilizando ferramenta disponível pelo CRESESB (2001).

Uma vez de posse dos parâmetros, (III) calcula-se a distribuição de frequência de Weibull $f(V)$, Eq.1 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001):

Para se obter a energia extraída do vento local, (IV) seleciona-se os modelos de turbinas comerciais e realiza-se a análise comparativa entre aerogeradores de eixo vertical e horizontal. O cálculo da produção anual de energia é feito utilizando-se as curvas de potência das máquinas, para extrair a potência em kW para cada velocidade. Assim, (V) utilizando-se Eq. 9, estima-se a produção anual de energia (PAE).

Um fluxograma que representa essa metodologia apresentada está descrito na Fig. 14:



Fonte: O autor

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Essa seção contém a análise dos resultados obtidos.

4.1. Determinação dos Parâmetros de Weibull

Para a obtenção dos parâmetros de Weibull k (fator de forma) e c (Fator de escala), foi utilizado uma ferramenta disponibilizada pelo CRESESB que fornece esses parâmetros de acordo com a localização geográfica.

Sabendo que a localização geográfica de Caraúbas - RN em coordenadas é $5^{\circ}47'33''S$ e $37^{\circ}33'24''O$ (Google Earth[®]). Utilizou-se de três pontos geográficos aleatórios como dados de entrada a fim de aferir um valor médio para os parâmetros k e c . O primeiro ponto foi $5^{\circ}46'58,34''S$ e $37^{\circ}33'28,44''O$, o segundo ponto foi $5^{\circ}46'42,45''S$ e $37^{\circ}33'35,56''O$, e o terceiro ponto foi $5^{\circ}46'23,51''S$ e $37^{\circ}34'11,27''O$. A Fig. 15 mostra a localização dos pontos.

Figura 15: Localização dos pontos utilizados nesse estudo.



Fonte: Google Earth[®]

Os valores médio anuais de k e c para este estudo são 2,44 e 5,71 m/s, respectivamente, conforme a Tabela 2 a seguir.

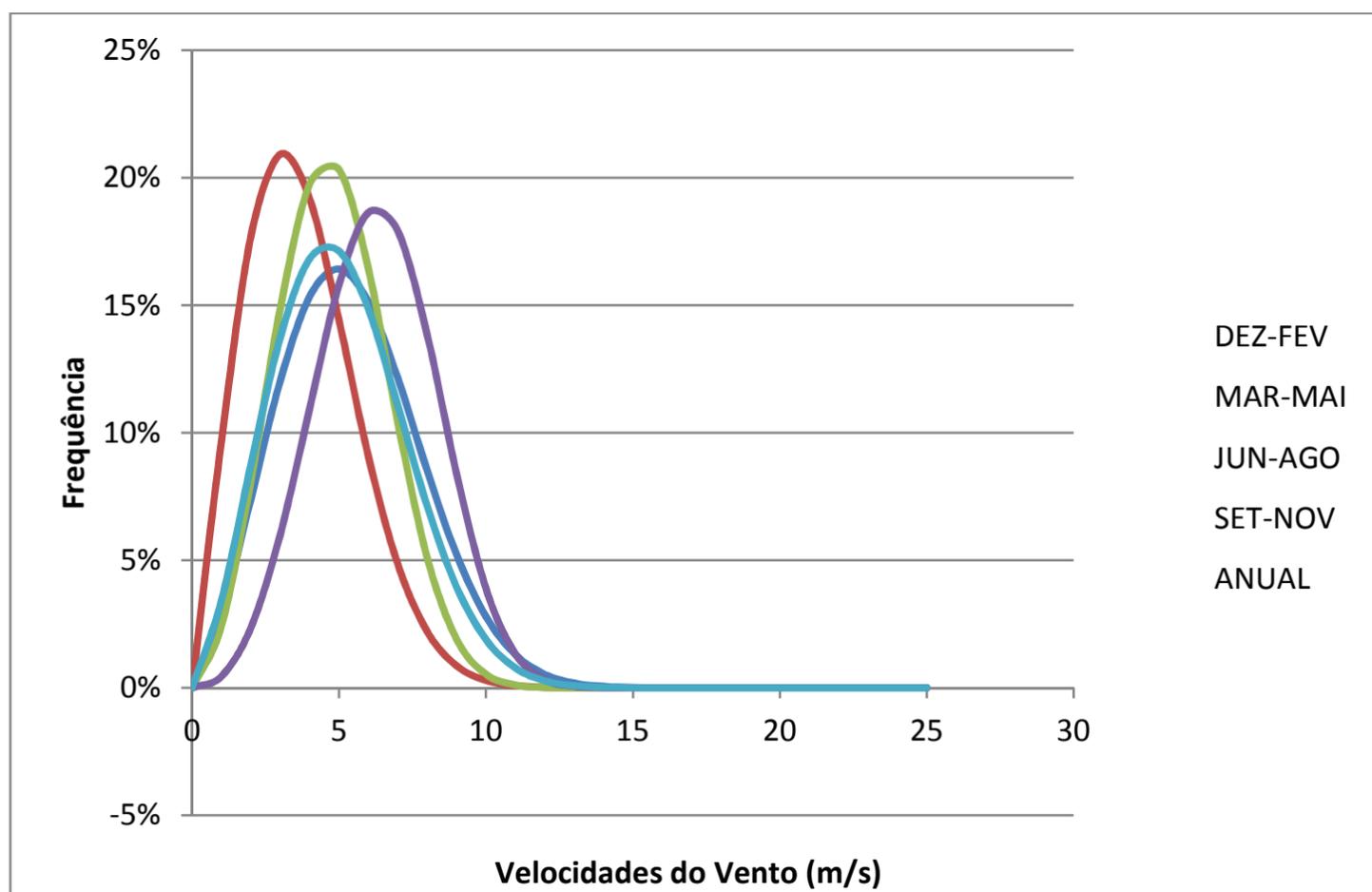
Tabela 2: Parâmetros de Weibull: fator de forma e escala

Parâmetros de Weibull					
	DEZ-FEV	MAR-MAI	JUN-AGO	SET-NOV	ANUAL
K	2,47	2,1	2,82	3,41	2,44
c(m/s)	6,09	4,23	5,39	6,99	5,71

Fonte: O autor

4.3 Distribuição de Frequência de Weibull

Determinou-se a Distribuição de frequência de Weibull ($f(V)$) para uma variação de velocidade de 0 a 25 m/s, fazendo uso da Eq. 4, onde k e c são os valores da Tabela 2. A Fig. 16 foi obtida a partir dos valores da Tabela 3, que correspondem à Distribuição de Frequência de Weibull.

Figura 16: Distribuição de frequência de Weibull

Fonte: O autor

4.4 Seleção de Turbinas Comerciais e Potência Produzida

Para esse estudo utilizou-se de quatro tipos de turbinas: duas de eixo horizontal, que foram a EOLTEC com potência nominal de 6 kW e a ENERSUD também com potência nominal de 6 kW; e duas de eixo vertical, que foram a USA solar (tipo Savonius) e a QR5 (Tipo Darrius), cujos dados fundamentais para análise dos aerogeradores, podem ser vistos na Tabela 4 e na Tabela 5 segundo Melo (2009).

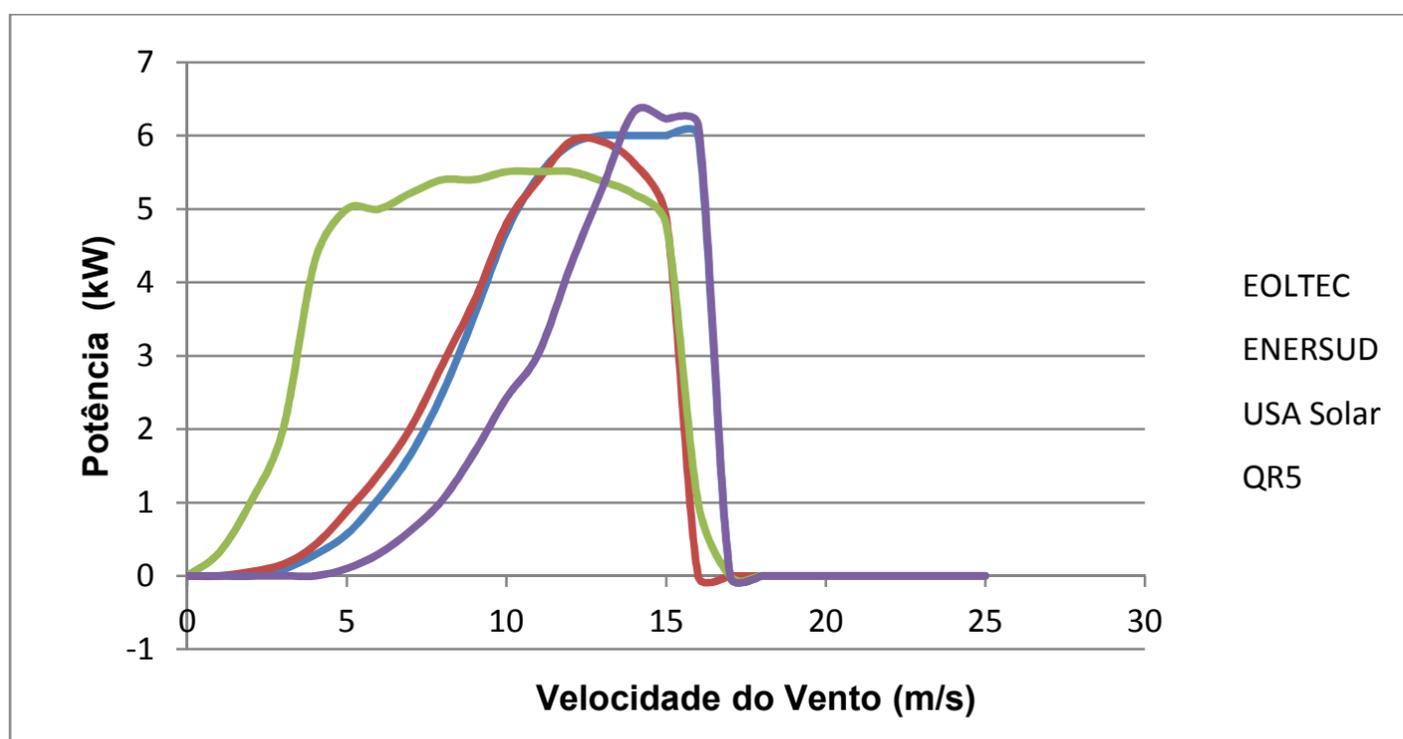
Tabela 3: Características das turbinas selecionadas

Características	Turbinas			
	Horizontal		Vertical	
	EOLTEC	ENERSUD	USA solar	QR5
Potência Nominal (KW)	6,0	6,0	5	6,333
Nº de pás	2	3	9	3
Velocidade Nominal (m/s)	11,5	12	16	17
Velocidade de partida (m/s)	2,7	2,2	2	4
Área Varrida (m ²)	24,7	24,2	5	5

Fonte: Adaptado de Melo, 2009.

As potências extraídas pelas máquinas, para cada velocidade, estão listadas na Tabela 6, de acordo com os gráficos de potência fornecido pelas marcas das turbinas.

A Fig. 17 apresenta as curvas de potência das máquinas selecionadas a partir dos dados fornecidos pelas marcas fabricantes.

Figura 17: Potência das máquinas para determinadas velocidades

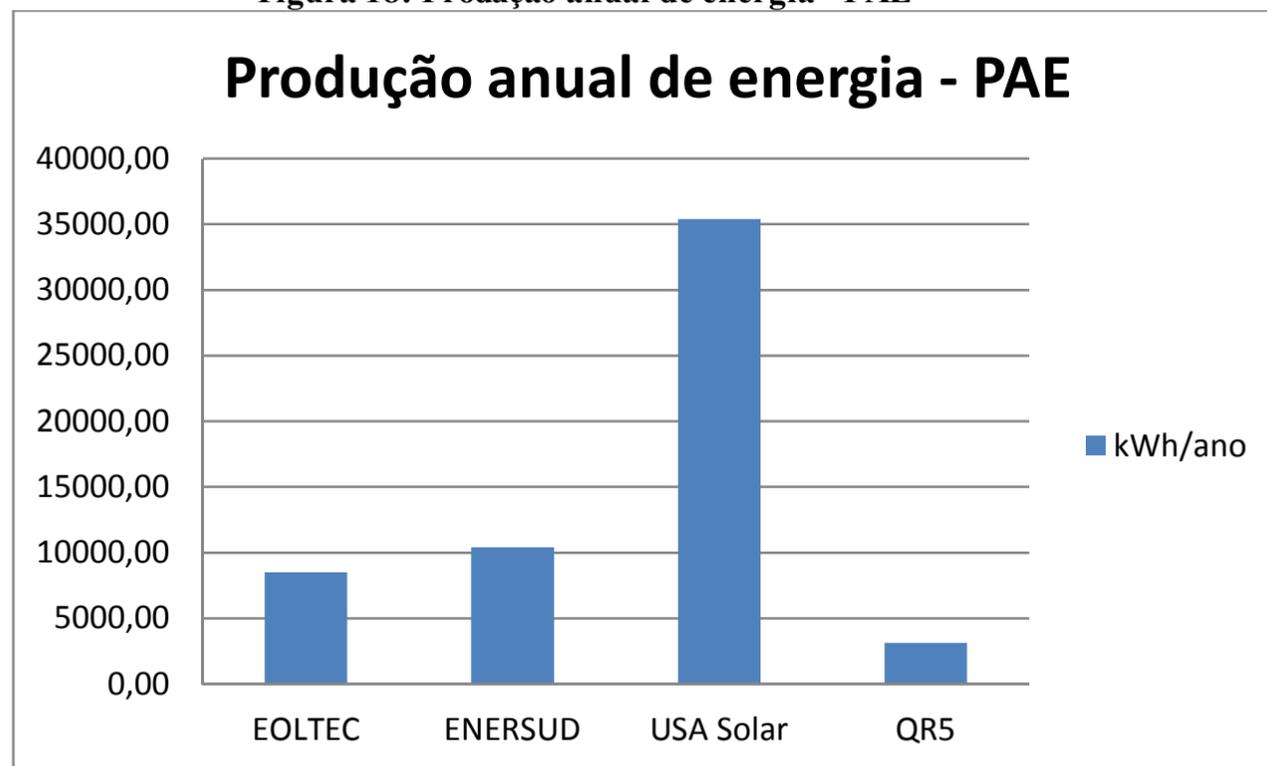
Fonte: O autor

4.5 Produção Anual de Energia (PAE)

Define-se a PAE, utilizando a Eq. 12, ao aplicarmos os valores na equação encontramos os valores descritos na Tabela 7:

Os valores da PAE podem ser obtidos a partir da Eq. 12, utilizando-se os dados da Tabela 7. Para as turbinas selecionadas os valores calculados são: 8.519,90 kWh/ano para EOLTEC, 10.490,76 kWh/ano para a ENERSUD, 35.398 KWh/ano para a USA Solar e 3.138 KWh/ano para a QR5. Mostrado na fig. 18.

Figura 18: Produção anual de energia - PAE



Fonte: O autor

Assim, a turbina de maior *PAE* é a USA solar, porém, será necessário analisar o Fator de Capacidade, que corresponde à razão entre a produção efetiva da usina e sua capacidade de produção máxima, em um determinado período de tempo. A turbina que apresentou maior aproveitamento para as condições de vento local também foi a USA Solar, alcançando 81% de sua produção máxima. Essa análise está representada na Tabela 8.

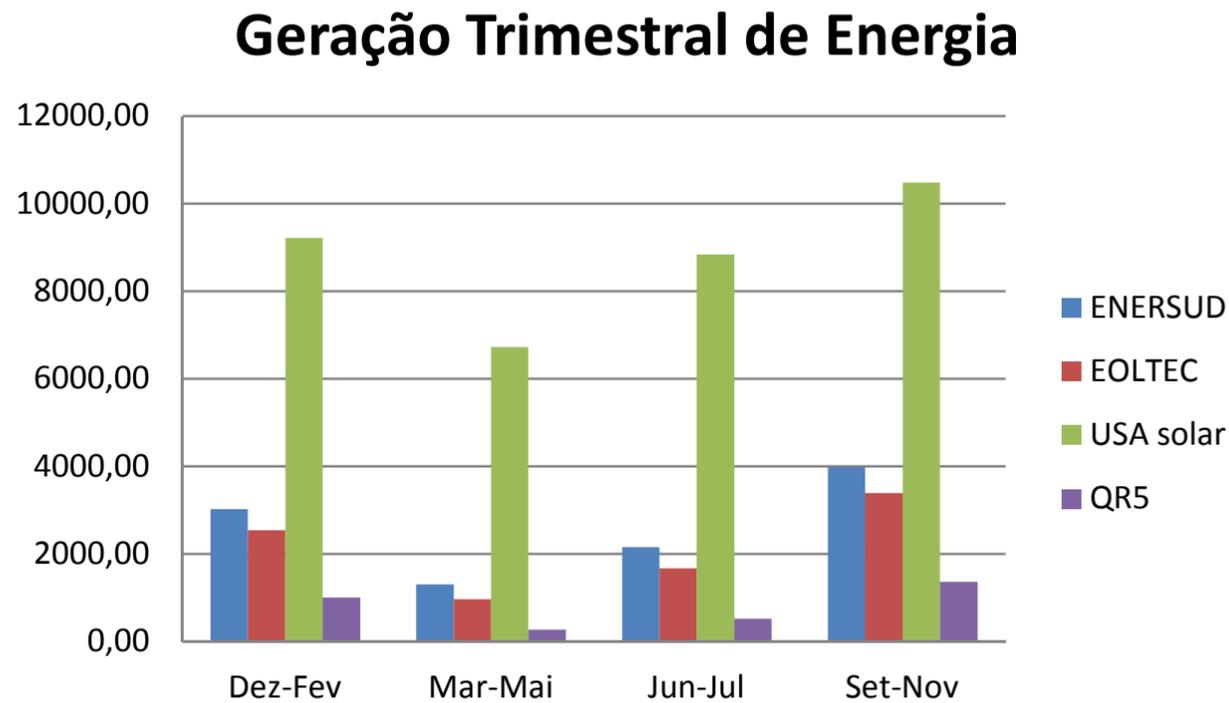
Tabela 4 - Determinação do Fator de Capacidade

Turbina	Velocidade Média Anual a 50m (m/s)	Potência Nominal (kW)	Energia Disponível (KWh/ano)	Produção Anual de Energia (KWh/ano)	Fator de Capacidade (%)
EOLTEC	5,06	6	52.560	8.519,90	16%
ENERSUD	5,06	6	52.560	10.409,76	20%
USA solar	5,06	5	43.800	35.398,00	81%
QR5	5,06	6,33	55.450,8	3.138,00	6%

Fonte: O autor

É possível também obter resultados trimestrais de cada turbina, onde se pode analisar em que período do ano ocorrerá uma maior e menor geração de eletricidade, a Fig. 19 mostra a geração de energia a cada três meses para os tipos de turbinas selecionadas.

Figura 19: Geração trimestral de energia.



Fontes: O autor

É possível também estimar a capacidade necessária para suprir a demanda energética da cidade de Caraúbas. A Tabela 9 mostra o consumo do estado do Rio Grande do Norte.

Tabela 5: Consumo e número de consumidores do RN.

Rio Grande do Norte - Consumption and Number of consumers								
	2010	2011	2012	2013	2014	Δ% (2014/2013)	Part. % (2014)	
Consumo (GWh)	4.523	4.578	4.870	5.216	5.466	4,8	100	Consumption (GWh)
Residencial	1.468	1.531	1.636	1.805	1.933	7,1	35,4	Residencial
Industrial	1.263	1.245	1.239	1.288	1.323	2,7	24,2	Industrial
Comercial	852	879	922	998	1.067	6,9	19,5	Commercial
Rural	322	297	407	420	424	0,9	7,8	Rural
Poder público	224	227	248	282	283	0,3	5,2	Public Sector
Iluminação pública	147	148	155	159	171	7,6	3,1	Public lighting
Serviço público	240	242	255	256	256	0,2	4,7	Public service
Consumo próprio	8	7	8	8	9	8,0	0,2	Own use
Consumidores (unidades)	1.132.966	1.163.841	1.212.180	1.255.080	1.303.632	3,9	100	Consumers (units)
Residencial	967.925	999.567	1.038.273	1.076.050	1.122.564	4,3	86,1	Residencial
Industrial	5.228	5.044	4.904	4.784	1.529	-68,0	0,1	Industrial
Comercial	74.807	76.488	78.336	81.641	85.895	5,2	6,6	Commercial
Rural	66.220	63.233	70.274	71.814	71.984	0,2	5,5	Rural
Poder público	11.911	12.024	12.413	12.404	12.581	1,4	1,0	Public Sector
Iluminação pública	5.191	5.685	6.081	6.404	7.024	9,7	0,5	Public lighting
Serviço público	1.583	1.613	1.703	1.771	1.851	4,5	0,1	Public service
Consumo próprio	101	187	196	212	204	-3,8	0,0	Own use

Fonte: Cosern (2015)

Obtendo o consumo médio anual por pessoa através da divisão do consumo residencial pelo número de habitantes do Rio Grande do Norte que segundo o IBGE (2014) a população estimada para o ano de 2015 e de 3.442.175 habitantes, temos que cada pessoa consome aproximadamente 561,56 kW por ano, a população de Caraúbas segundo o IBGE (2014) é de

21.750 habitantes. Multiplicando o consumo per capita pela quantidade de habitantes temos o consumo anual de Caraúbas que é aproximadamente 12.214.017,00 kWh por ano.

Através dos valores de geração elétrica obtidos pelas turbinas selecionadas seria possível suprir toda a demanda energética de Caraúbas utilizando-se 1.434 aerogeradores EOLTEC, 1.174 ENERSUD, 345 USA solar e 3893 QR5.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Este trabalho teve como principal objetivo realizar um análise comparativa entre aerogeradores de pequeno porte de eixo horizontal e vertical para as condições de vento na cidade de Caraúbas - RN. Diante disso conclui-se que;

- A turbina mais indicada para as condições de vento local foi à turbina de eixo vertical USA solar, com fator de capacidade, aproximadamente 81% para os ventos locais.
- O período do ano de melhor rendimento foram os meses de setembro a novembro.
- Diante do consumo local seria necessário 345 aerogeradores USA solar para suprir a demanda energética da cidade de Caraúbas - RN.

Sugestão para trabalhos futuros seriam projetar e testar um aerogerador do tipo USA solar, e realizar um estudo de viabilidade para a demanda energética de uma residência.

6 REFERÊNCIAS

ABEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica. 2015. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/>>. Acesso em: 15 Novembro 2015.

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**, 2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em: 25 Nov. 2015.

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: 26 nov. 2015.

BORGES, Carmem L.t. **Energia Eólica**. 2013. 49 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

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

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: 20Nov. 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Eólico. **CRESESB**, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 20 Nov. 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Potencial Eólico. **CRESESB**, 2013. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>>. Acesso em: 22 Nov. 2015.

COSERN. **Consumo de Energia do Rio Grande do Norte**. 2015. Disponível em: <<http://www.cosern.com.br/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 03 dez. 2015.

FLECK, Gustavo Dias. **Simulação de grandes escalas para análises numéricas da esteira aerodinâmica da turbina eólica NREL UAE PHASE VI**. 2012. 75 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

G1. Produção de energia nas hidrelétricas cai 6%; nas termelétricas sobe 5%. **G1**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2015/07/producao-de-energia-nas-hidreletricas-cai-6-nas-termeletricas-sobe-5.html>>. Acesso em: 19 Nov. 2015.

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.

GLAUERT, H. Airplane propellers, em: W. F. Durand (Ed.), **Aerodynamic Theory**, Volume IV, Divisão L. Peter Smith Pub., Gloucester, Massachusetts (rep. 1976), 1935. p. 170–360.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Statistics. **GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL**, 2013. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 10 Nov 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades@. **IBGE**, 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=240230>>. Acesso em: 3 Novembro 2015.

LEMOS, Daniel Faro Amaral. **Análise de Projeto de Turbina Eólica de Grande Porte para as Condições Climáticas da Região Nordeste do Brasil**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2015.

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).

LURTZ, Oliver. **Situação, Necessidade de desenvolvimento, concepção de configuração e perspectivas de aerogeradores de pequeno porte a serem utilizados no Brasil:** . 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

MERTENS, S. Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings. *Refocus*, Delft, v. 3, n. 2, p. 22-24, Março/Abril 2002. ISSN 1471-0846.

MELO, Gilberto Martins de. **Um estudo de viabilidade de pequenos aerogeradores na produção de energia elétrica.** 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MELLO, V.F. e SILVA, W.S., 2003, “**Análise da Viabilidade Econômica de Instalação de Uma Turbina Eólica na Lagoa dos Patos**” , Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

PAULA, Midiã Naara de Brito. **Estimativa do potencial eólico offshore em Fernando de Noronha/PE.** 2014. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Caraúbas, 2014.

OLIVEIRA FILHO, OYAMA DOUGLAS QUEIROZ DE. **Uma Metodologia Simplificada para Estimativa do Aproveitamento Eólico Offshore no Litoral Brasileiro. Estudo de Caso: A Ilha de Itamaracá/PE.** Recife: UFPE, 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

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

SANTOS, Alisson Alves do. **Projeto de Geração de Energia Eólica.** 2006. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica Industrial, Universidade Santa Cecília, Santos, 2006.

APÊNDICE

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	3%	10%	2%	0%	3%
2	7%	18%	8%	2%	9%
3	12%	21%	15%	6%	14%
4	15%	19%	20%	11%	17%
5	16%	14%	20%	16%	17%
6	15%	9%	16%	19%	15%
7	12%	5%	10%	18%	11%
8	9%	2%	5%	14%	7%
9	5%	1%	2%	8%	4%
10	3%	0%	1%	4%	2%
11	1%	0%	0%	1%	1%
12	1%	0%	0%	0%	0%
13	0%	0%	0%	0%	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%
21	0%	0%	0%	0%	0%
22	0%	0%	0%	0%	0%
23	0%	0%	0%	0%	0%
24	0%	0%	0%	0%	0%
25	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: O autor

Tabela 7 - Potência das máquinas para determinadas velocidades

Velocidade (m/s)	Potência Produzida (kW)			
	EOLTEC 6KW	ENERSUD 6KW	USA solar 5KW	QR5 6,33KW
0	0	0	0	0
1	0	0	0,32	0
2	0	0,06	1,02	0
3	0,09	0,16	2	0
4	0,29	0,42	4,3	0
5	0,57	0,88	5	0,1
6	1,06	1,39	5	0,3
7	1,66	2,02	5,22	0,62
8	2,5	2,89	5,4	1,04
9	3,56	3,76	5,4	1,69
10	4,7	4,8	5,51	2,43
11	5,45	5,4	5,51	3,03
12	5,88	5,92	5,51	4,22
13	6	5,92	5,38	5,29
14	6	5,62	5,2	6,33
15	6	4,88	4,79	6,23
16	0	0	1	6,15
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0
25	0	0	0	0

Fonte: O autor

Tabela 8 - Produção de Energia das máquinas para determinadas velocidades

Velocidade (m/s)	Produção de Energia (MWh)			
	EOLTEC 6KW	ENERSUD 6KW	USA solar 5KW	QR5 6,33KW
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	96,09	0,00
2	0,00	45,89	780,20	0,00
3	108,31	192,56	2406,96	0,00
4	427,40	619,00	6337,34	0,00
5	855,04	1320,06	7500,33	150,01
6	1378,64	1807,83	6503,00	390,18
7	1610,13	1959,31	5063,18	601,37
8	1560,41	1803,83	3370,48	649,13
9	1233,60	1302,90	1871,19	585,61
10	778,61	795,17	912,79	402,56
11	370,64	367,24	374,72	206,06
12	140,49	141,44	131,65	100,83
13	42,94	42,37	38,50	37,86
14	10,92	10,23	9,47	11,53
15	2,35	1,91	1,88	2,44
16	0,43	0,00	0,07	0,44
17	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: O autor