



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO CAMPUS CARAÚBAS  
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

VALÉRIA NUNES DA COSTA

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA UTILIZAÇÃO  
DE GERAÇÃO EÓLICA DE PEQUENO PORTE DISTRIBUÍDA**

CARAÚBAS

2017

VALÉRIA NUNES DA COSTA

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA UTILIZAÇÃO  
DE GERAÇÃO EÓLICA DE PEQUENO PORTE DISTRIBUÍDA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Rafael Luz Espindola

CARAÚBAS

2017

© 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 nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-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.

C837a Costa, Valéria Nunes da.  
Análise da redução de gases de efeito estufa  
pela utilização da geração eólica de pequeno porte  
distribuída / Valéria Nunes da Costa. - 2017.  
43 f. : il.

Orientador: Rafael Luz Espindola.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2017.

1. Eólica. 2. Geração. 3. Distribuída. I.  
Espindola, Rafael Luz, orient. II. Título.

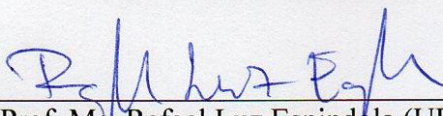
VALÉRIA NUNES DA COSTA

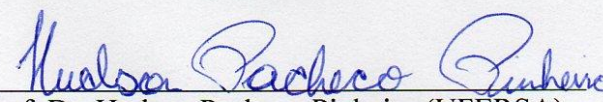
**ANÁLISE DA REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA UTILIZAÇÃO  
DA GERAÇÃO EÓLICA DE PEQUENO PORTE DISTRIBUÍDA**

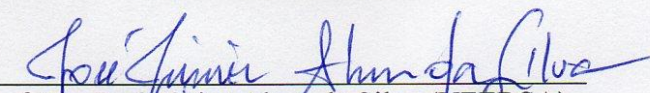
Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em Ciência  
e Tecnologia.

Defendida em: 18 / 05 / 2 017.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Me. Rafael Luz Espindola (UFERSA)  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Hudson Pacheco Pinheiro (UFERSA)  
Membro Examinador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Júnior Alves da Silva (UFERSA)  
Membro Examinador

\_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente agradeço a Deus, por permitir que esse sonho se realize. Ele que sempre me guiou em cada passo dessa caminhada, mesmo diante de imprevistos e dificuldades o Senhor me deu forças para seguir adiante e garantir essa conquista.

Agradeço a minha família que sempre me ajudou, especialmente aos meus pais, Antônio Eron da Costa e Maria de Fátima Nunes da Costa que foram os maiores incentivadores dessa conquista, a minha filha Ana Laura da Costa Moreira por ser minha fonte de amor e carinho, e ao meu amado companheiro Daniel Max Soares Moreira por todo o apoio e paciência em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis, essa conquista é dedicada a vocês.

Aos amigos que sempre permaneceram ao meu lado em todos esses anos, vocês foram a melhor companhia que eu poderia ter, pelos momentos de lazer, pelas noites acordadas, pelos incentivos nos momentos difíceis agradeço a todos. Em especial a Carlos Júnior e Maria Lopes que são pessoas especiais as quais eu tive a sorte de conhecer. Agradeço também a minha amiga Luana Ferreira que sempre me ajudou e cuidou de mim durante toda essa caminhada. Agradeço também aos amigos Ismael e Enilson, vocês também contribuíram muito para essa conquista.

Agradeço também ao corpo docente e a universidade que foram as ferramentas essenciais dessa conquista, os responsáveis pelo conhecimento necessário para a execução deste trabalho. Especialmente ao meu orientador Rafael Espindola, pela atenção, paciência e dedicação na realização deste trabalho.

A Deus, meus pais amados, a minha  
linda filha e ao meu companheiro,  
vocês são a razão dessa conquista.

## RESUMO

A geração de energia elétrica é um dos setores que mais contribuem com a emissão de gases de efeito estufa. Assim, a procura por energias renováveis se destaca cada vez mais no âmbito mundial, pois estas surgem como uma alternativa para a produção de energia limpa. Nesse sentido a energia eólica tem ganhado cada vez mais relevância por ser renovável, limpa, inesgotável e possuir baixos impactos ambientais. Uma grande ferramenta da energia eólica é a geração distribuída de pequeno porte que se divide em micro e mini geração. Este trabalho objetiva uma análise da redução de gases de efeito estufa causada pela implementação de geração distribuída eólica de pequeno porte na cidade de Caraúbas-RN. Com base em parâmetros de vento cedidos pelo CRESESB e parâmetros estatísticos de Weibull calculados, encontramos a curva de potência para o aerogerador de eixo vertical USA solar e a redução que este causaria na emissão de gases de efeito estufa (GEE) se instalado na cidade de Caraúbas-RN.

**Palavras-chave:** Energia Eólica. Geração Distribuída. Gases de Efeito Estufa.

## **ABSTRACT**

Electricity generation is one of the sectors that contributes most to the emission of the greenhouse gases. Therefore, the demand for renewable energies stands out more and more in the global scope, because they appear as an alternative for the production of clean energy. In this sense wind energy has gained more and more relevance because it is renewable, clean, inexhaustible and has low environmental impacts. And a great tool of wind energy is the small distributed generation which is divided into micro e mini generation. This work objective of an analysis of the reduction of greenhouse gases caused by the implementation of small wind distributed generation in the city of Caraúbas-RN. Based on wind parameters ceded by CRESESB and calculated Weibull statistical parameters, we find the power curve for the vertical axis wind turbine USA solar and the reduction that this would cause in the emission of greenhouse gases (GHG) if installed in the city of Caraúbas-RN.

**Keywords:** Wind Energy. Distributed Generation. Greenhouse Gases.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Moinho de vento típico da Holanda.....                                                            | 16 |
| Figura 2: Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica no período do século XI ao século XIX..... | 17 |
| Figura 3: Aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus (a) e do tipo Savonius (b).....                     | 18 |
| Figura 4: Aerogerador de eixo horizontal. ....                                                              | 19 |
| Figura 5: Formação dos vento devido ao deslocamento das massas de ar.....                                   | 20 |
| Figura 6: Comportamento do vento sob a influência das características do terreno .....                      | 22 |
| Figura 7: Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A. ....                                       | 22 |
| Figura 8: Anemógrafo .....                                                                                  | 25 |
| Figura 9: Evolução da Capacidade de Energia Eólica Instalado acumulada no Brasil.....                       | 26 |
| Figura 10: Sistema de microgeração eólica.....                                                              | 29 |
| Figura 11: Sistema de compensação de energia. ....                                                          | 32 |
| Figura 12: Quantidade de emissão evitadas de CO <sub>2</sub> em toneladas por mês em 2016.....              | 32 |
| Figura 13: Fluxograma de um ciclo de vida de um parque eólico. ....                                         | 33 |
| Figura 14: Indicadores de carbono incorporado.....                                                          | 34 |
| Figura 15: Localização dos pontos geográficos utilizados.....                                               | 37 |
| Figura 16: Distribuição da Frequência de Weibull.....                                                       | 38 |
| Figura 17: Curva de Potência do USA solar.....                                                              | 39 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Capacidade instalada em 2016.....                                             | 27 |
| Tabela 2: Top 10 de países com as maiores capacidades acumuladas de energia eólica..... | 28 |
| Tabela 3: Características do aerogerador escolhido.....                                 | 35 |
| Tabela 4: Coordenadas geográficas dos três pontos.....                                  | 37 |
| Tabela 5: Frequência de Weibull e Potência do Aerogerador USA solar .....               | 39 |
| Tabela 6: Quantidade de emissão de CO <sub>2</sub> no cenário nacional .....            | 40 |
| Tabela 7: Consumo e Número de consumidores de 2016 do RN.....                           | 41 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – Área da seção transversal  
 $c$  – Fator de escala de Weibull  
 $C$  – Força de Coriolis  
 $DP$  – Densidade de potência  
 $E$  – Energia cinética  
 $f(v)$  – Frequência de Weibull  
 $H$  – Altitude do local  
 $I_{gCO_2}$  – Indicador de  $gCO_2$  para a fonte de energia  
 $k$  – Fator de forma de Weibull  
 $m$  – Massa de ar  
 $P$  – Potência disponível no vento  
 $p(v)$  – Curva de potência  
 $Pa$  = Pressão atmosférica do ar  
 $R$  = Constante do ar  
 $T$  – Temperatura ambiente  
 $v$  – Velocidade da partícula  
 $\mu$  – Fluxo de massa de ar  
 $\rho$  – Massa específica do ar  
 $\varphi$  – Latitude em graus  
 $\omega$  – Velocidade angular da Terra  
 $\Gamma$  – Função Gamma  
 $\sigma$  = Desvio padrão da velocidade do vento

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BIG – Banco de Informações de Geração

COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte

CRESESB – Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito

FC – Fator de Capacidade

GEE – Gases de Efeito Estufa

GWEC – Global World Energy Council

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PAE – Produção Anual de Energia

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

## SUMÁRIO

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....                                                                   | 13 |
| 1.1 Justificativa.....                                                              | 13 |
| 1.2 Objetivos.....                                                                  | 14 |
| 1.2.1 Objetivo Geral.....                                                           | 14 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos.....                                                    | 14 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                                                        | 15 |
| 2.1 História.....                                                                   | 15 |
| 2.2 Aerogeradores.....                                                              | 17 |
| 2.2.1 Aerogerador de Eixo Vertical.....                                             | 17 |
| 2.2.2 Aerogerador de Eixo Horizontal.....                                           | 18 |
| 2.3 O Vento.....                                                                    | 18 |
| 2.4 Potência do Vento.....                                                          | 21 |
| 2.5 Potencial Eólico.....                                                           | 23 |
| 2.5.1 Potencial Eólico no Brasil.....                                               | 25 |
| 2.5.2 Potencial Eólico no Mundo.....                                                | 26 |
| 2.6 Geração Distribuída.....                                                        | 27 |
| 2.6.1 Sistema de Microgeração Eólica.....                                           | 28 |
| 2.6.2 Vantagens, Desvantagens e Viabilidade de Sistemas de Microgeração Eólica..... | 28 |
| 2.7 Sistema de Compensação de Energia Elétrica.....                                 | 29 |
| 2.8 Redução de Emissão de CO <sub>2</sub> .....                                     | 30 |
| 3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....                                                      | 33 |
| 4 RESULTADOS.....                                                                   | 35 |
| 4.1 Parâmetros de Weibull.....                                                      | 35 |
| 4.2 Distribuição da Frequência de Weibull.....                                      | 36 |
| 4.3 Curva de Potência do Aerogerador.....                                           | 36 |
| 4.4 Produção Anual de Energia com o Aerogerador.....                                | 38 |
| 4.5 Emissão de CO <sub>2</sub> da Matriz Energética do Brasil.....                  | 38 |
| 4.6 Consumo Anual de Energia Elétrica da Cidade de Caraúbas-RN.....                 | 39 |
| 4.7 Análise da Redução de GEE pelo uso do Aerogerador.....                          | 39 |
| 5 CONCLUSÃO.....                                                                    | 40 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                   | 41 |

## **1 INTRODUÇÃO**

O presente trabalho expõe uma visão socioambiental sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) que aquecem nosso planeta e causam severas mudanças climáticas. Estudos mostram que a eletricidade é um dos setores que mais contribuem com estas emissões. Uma alternativa para a redução destas emissões é o investimento em fontes de energias limpas, como a solar, a eólica ou a energia hidráulica. A energia eólica é uma ferramenta que ganha cada vez mais destaque no cenário nacional por ser limpa, renovável e de grande potencial em nosso país, assim como a geração distribuída de pequeno porte que surge como um auxílio a redução de consumo de energia elétrica doméstica por fontes de energia que emitem grandes quantidades de GEE.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2016), a matriz energética brasileira é uma das mais limpas do mundo. Quando considerada a oferta de energia elétrica, as fontes renováveis participam com um indicador de 79,3% (superior a 2015 que teve indicador de 75,5%). No mundo este indicador é de somente 24%. A fonte renovável hidráulica é a que prevalece, com 66,2% de participação na matriz energética.

Nesse sentido, o setor de energia eólica de pequeno porte ainda se encontra em formação inicial no país. Esse setor é dividido em dois segmentos, a micro e a mini geração de energia eólica. Na micro geração é utilizada uma central geradora com potência inferior ou igual a 100kW, e na mini geração a central geradora tem potência superior a 100kW e inferior ou igual a 1MW (CRUZ, 2015).

Com essa perspectiva, existe a necessidade e a importância das políticas de incentivo bem como a certificação de aerogeradores de pequeno porte. No Brasil a Portaria INMETRO nº 168/2015 trata da certificação de aerogeradores destinados para produção de energia elétrica, e as políticas de incentivo tem por objetivo incentivar a utilização de micro e mini geradores que utilizam fontes renováveis.

### **1.1 Justificativa**

Com a preocupação sobre a emissão de GEE, que aquecem nosso planeta e causam severas mudanças climáticas, e a crescente demanda por energia elétrica, a geração eólica distribuída de pequeno porte surge como um auxílio a complementar o fornecimento de energia elétrica. Por ser renovável, limpa, não poluente, inesgotável e possuir baixos impactos ambientais a energia eólica tem ganhado cada vez mais destaque no mundo.

Internacionalmente, a geração eólica de pequeno porte vem se desenvolvendo cada vez, enquanto que o setor de grande porte possui um crescimento constante no Brasil. Considerando que o país possui uma matriz energética com predominância de fontes renováveis, e que sempre busca diversificar com o crescente uso de fontes limpas distintas, podemos esperar que a inclusão desta tecnologia seja propícia para o Brasil.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos a serem alcançados neste trabalho se dividem em geral e específicos.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Mostrar a importância do uso de fontes renováveis para produção de energia elétrica limpa como ferramenta para a redução na emissão de gases de efeito estufa.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a inserção da energia eólica na matriz energética brasileira em comparação com outros países.
- Apresentar a geração eólica de pequeno porte na cidade de Caraúbas-RN.
- Calcular a redução de gases de efeito estufa com o uso da energia eólica em substituição de outra fonte de energia não renovável.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é realizada a apresentação da fundamentação teórica utilizada para a realização do trabalho.

### 2.1 História

Os primeiros registros históricos dos moinhos de vento tem origem remota e incerta. Na Pérsia durante o século VII a.C., estes eram utilizados para moer grãos. Esses cata-ventos rústicos apresentavam grande vantagem substituindo a força motriz humana ou animal, mesmo com baixa eficiência devido a suas características.

Na Europa, principalmente na França, na Holanda, e na Inglaterra apareceram somente século XII. Elas eram construídas com quatro a oito vigas de madeira, com comprimentos de 3m a 9m na sua parte superior, e cobertas com telas ou pranchas de madeira. Assim, conseguiam transmitir a energia gerada pelo giro dessas vigas para a base onde estavam as máquinas dos moinhos (Lopez, 2012, p.26). A Figura 1 mostra a configuração típica de um moinho de vento desse tipo.

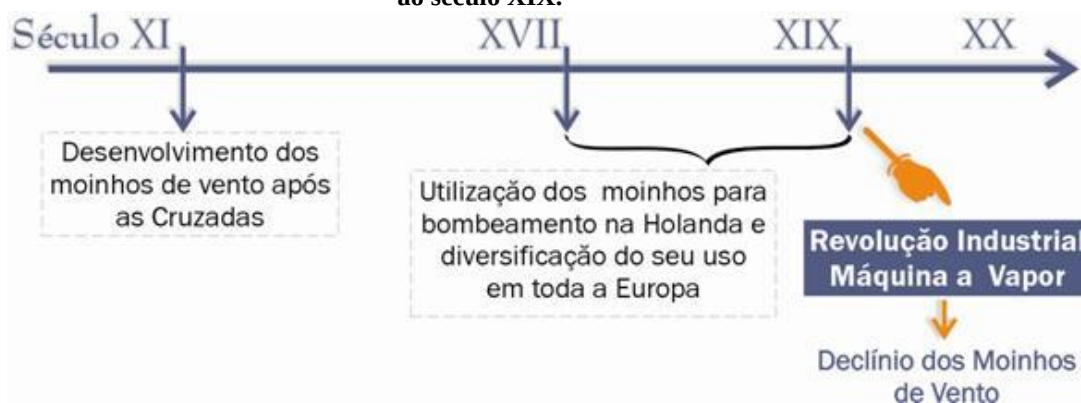
**Figura 1: Moinho de vento típico da Holanda.**



**Fonte: (CRESEB, 2017)**

A Figura 2 apresenta uma linha do tempo do desenvolvimento da energia eólica desde o século XI até o século XIX

**Figura2: Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica no período do século XI ao século XIX.**



Fonte: (CRESESB, 2017)

Com relação ao desenvolvimento da energia eólica, Lopez (2012, p.28) diz que:

*O desenvolvimento desses equipamentos estanca com o advento da revolução industrial, no século 19, quando a fonte de energia motriz é direcionada para o vapor, a eletricidade e os combustíveis fósseis. Entretanto, na segunda metade do século 19 surge o moinho de pás múltiplas americano, considerado um dos mais importantes avanços na tecnologia de aproveitamento do vento, utilizado para o bombeamento de água praticamente em todo o mundo e cujas características fundamentaram são as bases para o projeto dos modernos geradores eólicos.*

Ainda de acordo com Lopez (2012, p.28), também foram desenvolvidos outros tipos de aplicações para os moinhos de vento como serrarias e fábricas de papel, e melhorias foram feitas na aerodinâmica das pás, e freios foram incorporados. Ao final de século XIX iniciou-se a utilização de turbinas eólicas para geração elétrica na Dinamarca e no início do século XX os Estados Unidos propagavam o uso de aerogeradores de pequeno porte em fazendas e comunidades rurais. A Rússia, por sua vez, investia na conexão de aerogeradores de médio e grande porte na rede (LOPEZ 2012, p.28).

O primeiro cata-vento utilizado para geração eólica foi construído na cidade de Cleveland, Ohio em 1888 por Charles Brush. Ele fornecia 12 KW em corrente contínua para o fornecimento de energia de 350 lâmpadas incandescentes e operou durante 20 anos até que foi desativado em 1908 (LOPEZ 2012, p.29). Segundo Lopez (2012, p.29), “o

primeiro aerogerador de grande dimensão foi construído na França, em 1929, e era constituído de duas pás com 20 m de diâmetro.”

## 2.2 Aerogeradores

Os aerogeradores são equipamentos que utilizam a energia cinética dos ventos para a produção de energia elétrica e são divididos em dois tipos: os aerogeradores de eixo vertical e de eixo horizontal.

Segundo Custódio (2009) a classificação de aerogeradores, em relação à capacidade de geração elétrica, dá-se em: pequeno, com potência até 60kW; médio, com potência entre 130 a 750kW; e grande, com potência de 1.500 a 6.400kW.

### 2.2.1 Aerogerador de Eixo Vertical

Os rotores de eixo vertical podem ser movidos por forças de sustentação e forças de arrasto. Eles têm a vantagem de não necessitarem de sistemas para monitorar as variações de direção do vento, assim reduzindo a dificuldade de projetos e da ação das forças de Coriolis. Os principais tipos são o Darrieus (Figura 3a), movido por forças de sustentação e composto de lâminas curvas de perfil aerodinâmico unidas ao eixo vertical; e o Savonius (Figura 3b), movido por forças de arrasto e composto por pás em forma de concha ligadas ao eixo vertical (CRESESB, 2008).

**Figura 3: Aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus (a) e do tipo Savonius (b).**



Fonte: (FÁCIL, 2017)

### 2.2.2 Aerogerador de Eixo Horizontal

Os rotores de eixo horizontal (Figura 4) são mais comuns, e também são movidos por forças de sustentação e forças de arrasto. Eles possuem sistemas que permitem que o disco varrido pelas pás esteja sempre perpendicular ao vento. Os rotores de eixo horizontal podem ser constituídos de uma pá e uma contrapeso ou de várias pás (duas, três ou múltiplas), e o disco varrido pelas pás pode ser a jusante do vento (downwind) ou a montante do vento (upwind), de acordo com CRESESB (2008).

**Figura 4: Aerogerador de eixo horizontal.**



**Fonte: (CRESESB, 2008)**

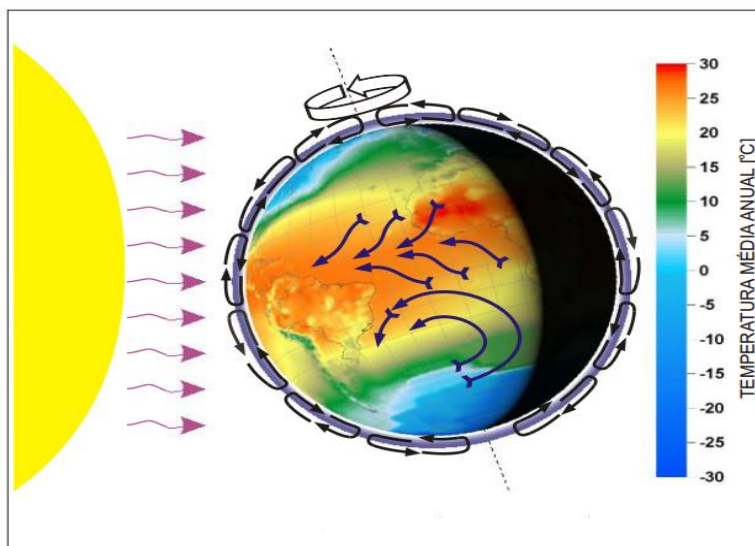
### 2.3 O Vento

Para trabalharmos com energia eólica precisamos determinar os recursos do vento em um determinado local específico, pois a energia que provem dos ventos é a base para a geração de energia eólica.

Os ventos são causados pelo aquecimento desigual da Terra, em função da radiação solar de em torno de  $1,39 \text{ kW/m}^2$  que ela recebe (Figura 5). A radiação solar que chega a Terra é parte absorvida e parte refletida. Essa parte de energia que é absorvida

pela superfície é parcialmente transferida para a atmosfera na forma de calor, por condução ou convecção. O aquecimento desigual da Terra provoca gradientes de pressão atmosférica com intensidades inversamente proporcionais as distâncias em que ocorrem e são responsáveis por movimentar massas de ar (LOPEZ 2012, p.31).

**Figura 5: Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.**



**Fonte: (CRESEB, 2008).**

De acordo com Lopez (2012, p.33), em alguns locais do globo terrestre existem ventos que são incessantes, devido as condições que os produzem estarem sempre presentes na natureza. Eles são chamados de ventos planetários ou constantes e se dividem em: Alísios (ventos que sopram dos trópicos para o equador, em baixas altitudes); Contra-alísios (ventos que sopram do equador para os polos, em altas altitudes); Ventos do oeste (ventos que sopram dos trópicos para os polos); e Polares (ventos frios que sopram dos polos para as zonas temperadas).

Uma força que tem influência sobre o movimento do vento, mudando sua velocidade e direção, é a força de Coriolis. Lopez (2012, p.32) diz:

*Uma massa que se desloque no sentido do equador ao polo, ou vice-versa, terá seu movimento angular alterado. De acordo com a lei da conservação da quantidade de movimento, esta massa ao sofrer alteração em uma direção também irá variar em outra direção, no sentido oposto, adquirindo uma quantidade de movimento transversal ao seu deslocamento. Uma massa que se desloque no sentido do polo ao equador terá um movimento circular com rotação no sentido oposto á da Terra.*

*Uma massa que se desloque no sentido do equador ao polo terá movimento circular no mesmo sentido da rotação da Terra.*

A força de Coriolis, por unidade de massa, é dada na Equação 1:

$$C = 2\omega v \sin\varphi \quad (1)$$

Onde:

$\omega$  = velocidade angular da Terra ( $7,29 \cdot 10^{-5}$  rad/s);

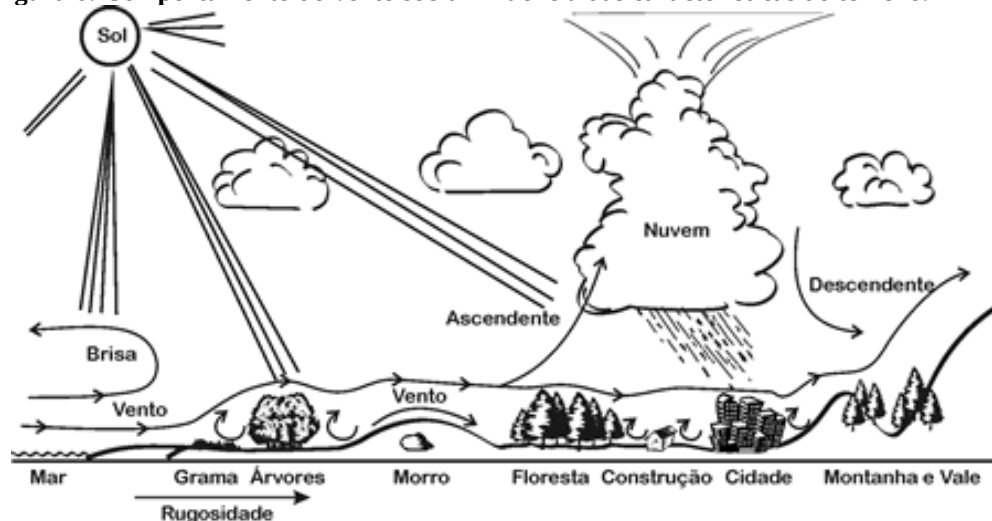
$v$  = velocidade da partícula em m/s

$\varphi$  = latitude em graus.

O efeito que a força Coriolis exerce é fazer com que o vento apresente movimentos tipicamente circulares, ou em espiras, ao redor dos centros de pressões, que provocam deslocamentos de massa de ar entre o equador e os polos (LOPEZ 2012, p.33).

Segundo Lopez (2012, p.33), quando o vento encontra obstáculos, ondas são formadas e o sentido é alterado para diferentes posições em torno de um eixo principal formando os redemoinhos. Turbulências também podem ser criadas por diferenças na temperatura do ar e assim reduzir a velocidade do vento, como o redemoinho do sotavento do rotor que tem influência na velocidade do vento incidente distanciada em até dez vezes o diâmetro do rotor (LOPEZ 2012, p.34). Essas variações significativas da velocidade do vento (Figura 6) devem ser avaliadas no local em que se deseja montar um aerogerador usando todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento.

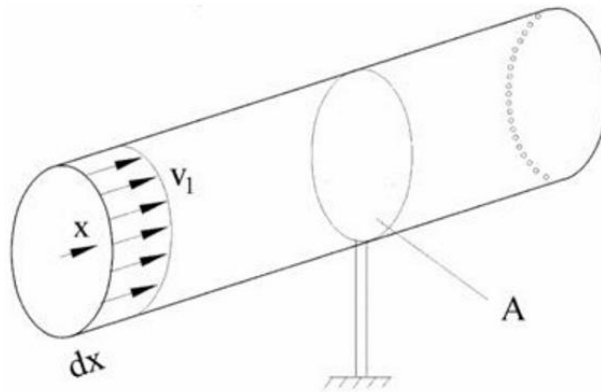
**Figura 6: Comportamento do vento sob a influência das características do terreno.**



## 2.4 Potência do Vento

De acordo com Lopez (2012, p.37), podemos definir a potência do vento considerando um fluxo de ar que se move a uma velocidade  $v$ , perpendicular à seção transversal de um cilindro, como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A.



Fonte: (CRESESB, 2008).

A energia cinética da massa de ar  $m$  em movimento com uma velocidade  $v$ , fornecida pela Equação 2:

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Onde:

$E$  = energia cinética [J];

$m$  = massa de ar [kg];

$v$  = velocidade da massa de ar em movimento (vento) [m/s].

A potência  $P$  disponível no vento é definida como a derivada da energia no tempo, Equação 3:

$$P = \frac{\dot{m} v^2}{2} \quad (3)$$

Onde:

$P$  = potência disponível no vento [W];

$\dot{m}$  = fluxo de massa de ar [kg/s];

$v$  = velocidade da massa de ar em movimento (vento) [m/s].

O fluxo da massa de ar é mostrado na Equação 4:

$$\dot{m} = \rho v A \quad (4)$$

Onde:

$\dot{m}$  = fluxo de massa de ar [kg/s];

$\rho$  = massa específica do ar [g/m<sup>3</sup>];

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$A$  = área da seção transversal [m<sup>2</sup>].

Substituindo  $\dot{m}$  na Equação 3, temos a Equação 5:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^2 \quad (5)$$

Onde:

$P$  = potência disponível no vento [W];

$\rho$  = massa específica do ar [g/m<sup>3</sup>];

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$A$  = área da seção transversal [m<sup>2</sup>].

A Equação 5 também pode ser escrita por unidade de área, que define a densidade de potência **DP**, Equação 6:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (6)$$

As Equações 5 e 6, mostram uma relação direta entre a potência disponível no vento e a massa específica do ar. A massa específica do ar é mostrada na Equação 7, e depende da temperatura e pressão atmosférica.

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT} \quad (7)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$P_{atm}$  = pressão atmosférica do ar [PA];

$R$  = constante do ar [287 J/kgK];

$T$  = temperatura ambiente [°C].

Devido a altitude do local influenciar a temperatura ambiente e a pressão atmosférica, a massa específica do ar é dependente de ambas e pode ser expressa pela Equação 8:

$$\rho = \frac{353,4(1 - \frac{H}{45271})^{5,2624}}{273,15 + T} \quad (8)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$H$  = altitude do local [m];

$T$  = temperatura ambiente [°C].

## 2.5 Potencial Eólico

O comportamento do vento dever ser estudado e compreendido de forma rigorosa e com qualidade afim de se analisar de forma correta o funcionamento das máquinas. Devido ao fato da energia gerada variar com o cubo da velocidade do vento, um erro de 10% nas medições do vento causaria 33% de erro na previsão da energia gerada. A estimativa do potencial eólico de determinada localidade é baseada em dados de vento dessa localidade (CUSTÓDIO, 2009).

Custódio (2009), diz que para um projeto definitivo e de alta qualidade, somente devem ser consideradas estimativas de potencial eólico baseados em dados de vento de alta qualidade e realizados no próprio local de realização do projeto.

No início dos anos 1990 no Brasil, foram utilizados os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para medição de energia eólica no Ceará e em Fernando de Noronha (PE), e com os resultados obtidos foi possível a determinação do

potencial eólico local e foram instaladas as primeiras turbinas eólicas no Brasil (ANEEL, 2003).

**Figura 8: Anemógrafo.**



**Fonte: (PUCP, 2017)**

A curva que descreve a distribuição da velocidade do vento pode ser obtida por diferentes funções de densidade, destacando-se a função de densidade de probabilidade de Weibull, mostrada na Equação 9 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001):

$$f(v) = k \frac{v^{k-1}}{c^k} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (9)$$

Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$c$  = fator de escala [m/s];

$k$  = fator de forma [adimensional].

Para a obtenção da função de Weibull de um determinado local, é necessário o conhecimento de duas variáveis  $c$  (fator de escala) e  $k$  (fator de forma), chamadas de parâmetros de Weibull. Pode-se determinar esses parâmetros usando o método do desvio padrão da velocidade média e a função Gamma, obtendo assim as Equações 10 e 11 (CUSTÓDIO 2007, p.164)

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (10)$$

Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s];

$\Gamma$  = função Gamma [adimensional];

$k$  = fator de forma [adimensional].

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1,086} \quad (11)$$

Onde:

$\sigma$  = desvio padrão da velocidade do vento [m/s];

$v$  = velocidade do vento [m/s].

### 2.5.1 Potencial Eólico no Brasil

Foram instaladas 81 novas usinas eólicas em 2016 no Brasil, totalizando 2.013,97 MW de potência, nos estados do Rio Grande do Norte (lidera com 25 usinas instaladas), Ceará, Bahia, Pernambuco, Piauí e Rio grande do Sul (ABEEólica, 2016). Com 430 usinas eólicas, o ano de 2016 teve um crescimento de 23,06% de potência se comparado a dezembro de 2015, alcançando uma potência instalada acumulada de 10,75 GW, segundo a ABEEólica (2016).

**Tabela 1: Capacidade instalada em 2016.**

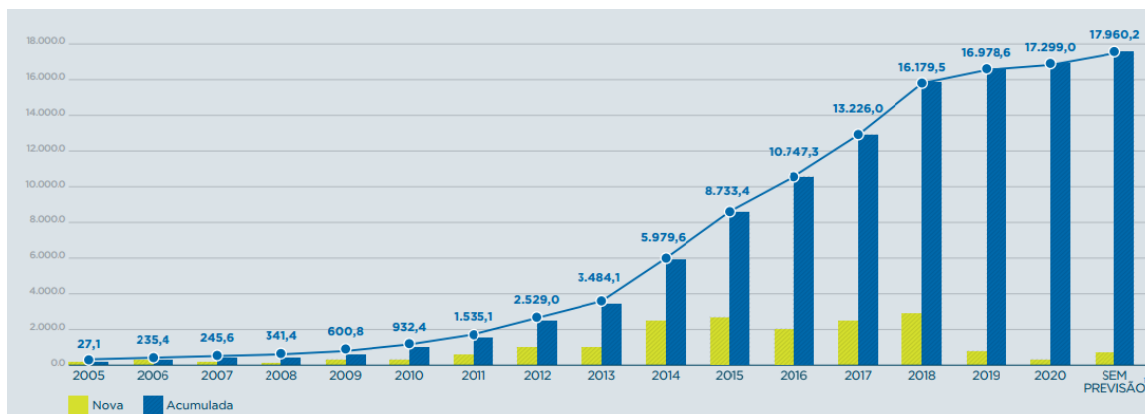
| Estado       | Nº de Usinas | Potência        |
|--------------|--------------|-----------------|
| RN           | 25           | 640,00          |
| CE           | 21           | 485,03          |
| BA           | 11           | 278,95          |
| PE           | 10           | 273,59          |
| PI           | 8            | 209,80          |
| RS           | 6            | 126,60          |
| <b>Total</b> | <b>81</b>    | <b>2.013,97</b> |

**Fonte: (ABEEólica, 2016)**

Segundo o Boletim Anual de Geração da ABEEólica (2016), o Brasil em 2016 alcançou a capacidade instalada de energia eólica de 11 GW e ocupou a nona posição no

Ranking Mundial de capacidade instalada, elaborado pelo GWEC (Global World Energy Council), ultrapassando a Itália. A Figura 9 mostra a evolução da capacidade instalada no Brasil.

**Figura 9 - Evolução da Capacidade de Energia Eólica Instalado acumulada no Brasil.**



Fonte: (ABEEólica, 2016).

## 2.5.2 Potencial Eólico no Mundo

Ministério de Minas e Energia (2014) diz que:

*A participação da geração eólica na geração total mundial, que era praticamente nula em 1980, em 2013 já atingia 2,7%. Os Estados Unidos apresentam a maior participação na geração eólica, de 27%, mas a China poderá ocupar a 1ª posição nos próximos anos. A Dinamarca, 2ª na proporção em 1990, perdeu posições, em seguida. A Dinamarca apresenta o maior proporção de geração eólica em relação à geração total, de 32,5%, vindo em seguida Portugal (23,3%), Alemanha (19%) e Irlanda (17,7%). Nos demais países, a proporção fica abaixo de 9%. O Brasil, 15º país em geração, é o 1º em fator de capacidade (FC), superando em 53% o FC mundial. Turquia, EUA e a Austrália aparecem com FC entre 33% e 32%.*

A energia eólica continua em grande crescimento a nível mundial, liderados pela Dinamarca com 40%, seguidos pelo Uruguai, Portugal e Irlanda com 20%, Espanha e Chipre em torno dos 20% e a Alemanha com 16%. E os grandes mercados da China, Estados Unidos e Canadá já possuem em 2016, 4%, 5,5% e 6% respectivamente, da sua geração de energia proveniente de eólicas (GWEC, 2017).

Na Tabela 2 encontramos os dez países com as maiores capacidade instalada acumulada de energia eólica.

**Tabela 2: Top 10 de países com as maiores capacidades acumuladas de energia eólica.**

| PAÍS                | MW             | %          |
|---------------------|----------------|------------|
| RP CHINA            | 168.690        | 34.7       |
| EUA                 | 82.184         | 16.9       |
| ALEMANHA            | 50.018         | 10.3       |
| ÍNDIA               | 28.700         | 5.9        |
| ESPAÑA              | 23.074         | 4.7        |
| REINO UNIDO         | 14.543         | 3.0        |
| FRANÇA              | 12.066         | 2.5        |
| CANADÁ              | 11.900         | 2.4        |
| <b>BRASIL</b>       | <b>10.740</b>  | <b>2.2</b> |
| ITÁLIA              | 9.257          | 1.9        |
| RESTO DO MUNDO      | 75.577         | 15.5       |
| <b>TOTAL TOP 10</b> | <b>411.172</b> | <b>84</b>  |
| <b>TOTAL</b>        | <b>486.749</b> | <b>100</b> |

Fonte: (ABEEólica, 2016)

## 2.6 Geração Distribuída

Com a crescente demanda por energia e a preocupação com a emissão de gases de efeito estufa, e sabendo-se que parte dessa emissão é causada pela geração de energia, cria-se pressão sobre os países para que haja um melhoramento nesse setor. Como solução para essa situação aparecem a micro e minigeração distribuída que possibilitam a produção de energia elétrica próxima ao local de consumo por meio de fontes limpas (CRUZ, 2015).

A geração distribuída se caracteriza como a geração de energia próxima do consumidor final, objetivando atender prioritariamente a este consumidor. Os microgeradores são sistemas que possuem potência de até 75 kW e os minigeradores potência acima de 75 kW e até 5MW (MME, 2014).

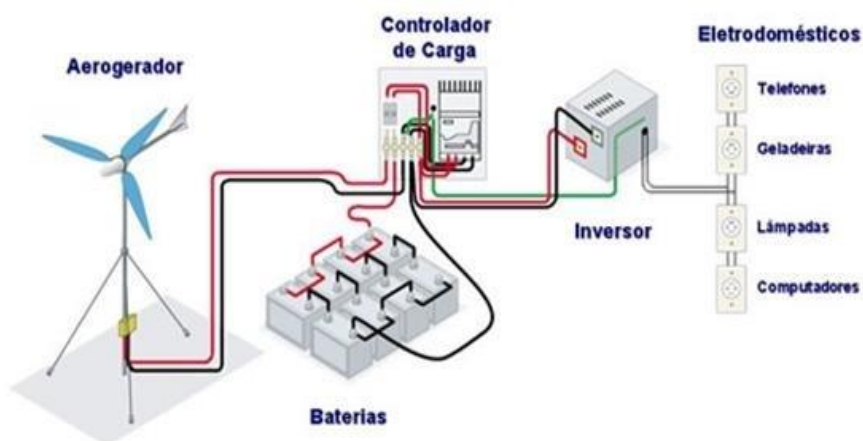
Esta atende a Resolução ANEEL nº 482/2012, que estabelece as regras para o acesso da micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, para centrais que utilizam energias renováveis. A resolução normativa também estabelece as regras para o sistema de compensação de energia elétrica, que permite a injeção da energia excedente da auto geração na rede distribuidora local de energia elétrica, em troca de créditos para uso no futuro (CRUZ, 2015).

### 2.6.1 Sistema de Microgeração Eólica

O potencial do mercado de aerogeradores de pequeno porte (APP) foi motivado pelos incentivos a geração distribuída, devido a Resolução Normativa nº 482/2002 que proporciona favoravelmente o mercado de APP com a categorização da energia eólica como opção de geração descentralizada (PEREIRA et al., 2015).

O sistema de microgeração eólica (Figura10) tem o seguinte funcionamento: o aerogerador converte energia eólica em energia elétrica, devido ao movimento que o vento executa sobre as pás do rotor; o controlador de carga controla a entrada de energia elétrica regulando para que não ocorram sobrecargas; baterias servem para o armazenamento de energia; inversor converte a corrente contínua da bateria em corrente alternada para a rede elétrica local (ENERGIA, 2010).

Figura 10: Sistema de microgeração eólica.



Fonte: (ENERGIA, 2010)

### 2.6.2 Vantagens, Desvantagens e Viabilidade de Sistemas de Microgeração Eólica

De acordo com Silva (2016), as vantagens, desvantagens e viabilidade da utilização de sistemas de microgeradores eólicos são:

#### Vantagens

- Não emitem GEE;
- Não geram resíduos durante sua operação;
- Produção de energia elétrica de forma limpo;

- O sistema tem boa durabilidade;
- Requerem pouca manutenção.

#### Desvantagens

- Sem boas medições de vento, precisão e mapeamento, não são fontes confiáveis;
- Possuem custos elevados;
- Poluição visual e sonora.

#### Viabilidade

- Incidências nas velocidades de vento da região;
- Tipo de topografia da região;
- Altitude da região;
- Condições climáticas;
- Custo de mão de obra e material.

## 2.7 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O sistema de compensação de energia elétrica desde de abril de 2012, quando a Resolução Normativa nº 482/2012 entrou em vigor, assegura que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica por meio de fontes renováveis ou cogeração qualificada e fornecer o excedente para rede distribuidora local (COPEL, 2013).

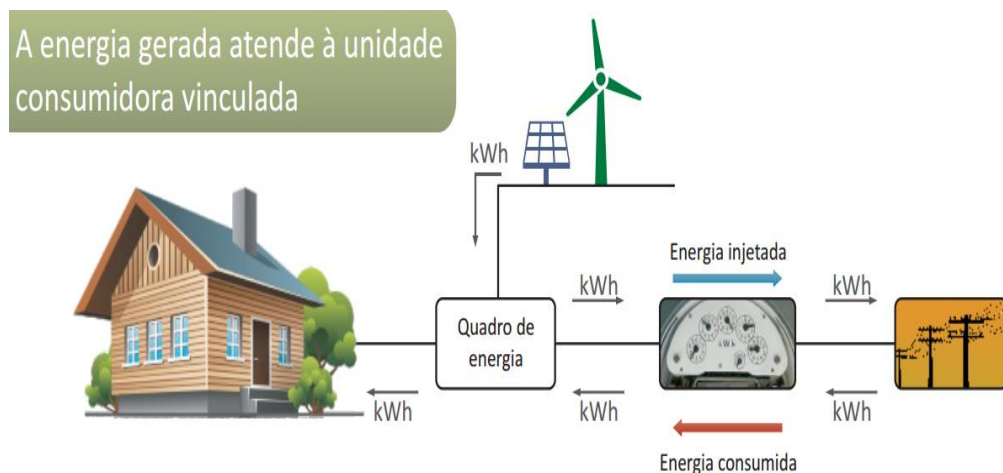
Silva (2015), fala que a compensação de energia funciona da seguinte forma:

*“Quando a geração for maior que o consumo, o saldo positivo de energia pode ser usado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura do mês seguinte. Esses créditos que ficam da energia gerada continuam válidos por 60 meses. Diante disso, ainda há a possibilidade do consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão e caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidores (por exemplo, condomínios). Importante lembrar que, para os consumidores conectados em alta tensão (Grupo A), será*

*dividida apenas a parcela da fatura correspondente à demanda contratada, já para os consumidores conectados em baixa tensão (Grupo B), mesmo que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será dividido o pagamento referente ao custo de disponibilidade – valor em reais equivalente a 30 KWh (monofásico), 50 KWh (bifásico) ou 100 KWh (trifásico). Nos momentos em que a central não gera energia suficiente para abastecer a unidade consumidora, a rede da distribuidora local suprirá a diferença. Nesse caso será utilizado o crédito de energia, ou caso não haja, o consumidor pagará a diferença.”*

A Figura 11 mostra o sistema de compensação de energia quando o consumidor não utiliza toda a energia e esta é injetada na rede de distribuição local.

**Figura 11: Sistema de compensação de energia.**

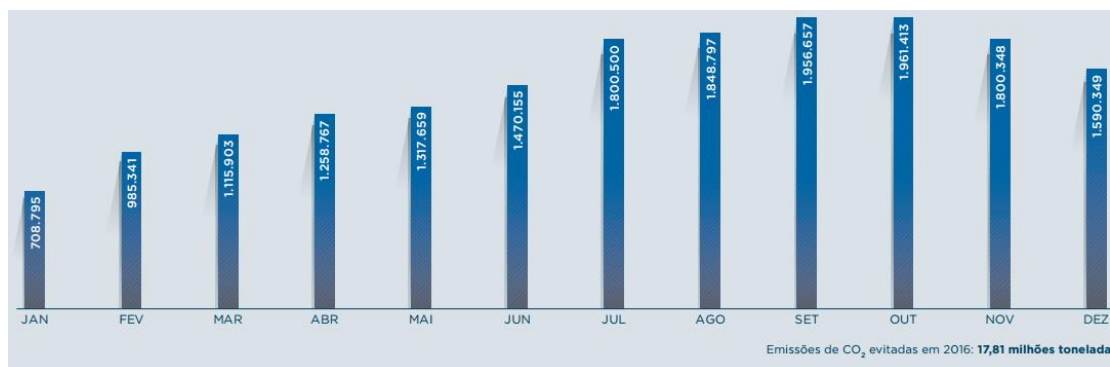


**Fonte: (ANEEL, 2016).**

## 2.8 Redução de emissão de CO<sub>2</sub>

A energia eólica é uma fonte de energia que possui baixo impacto na sua implantação e não emite CO<sub>2</sub> durante a sua operação, sendo assim uma ótima alternativa a substituição de outras fontes de energia que emitem CO<sub>2</sub> na geração de energia elétrica. Na Figura 12 são mostradas as quantidades de CO<sub>2</sub> que a utilização de energia eólica no Brasil reduz mensalmente. Em 2016 foram evitadas 17,81 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, o equivalente as emissões de 12 milhões de automóveis anualmente (ABEEólica, 2016).

**Figura 12: Quantidade de emissão evitadas de CO<sub>2</sub> em toneladas por mês em 2016.**

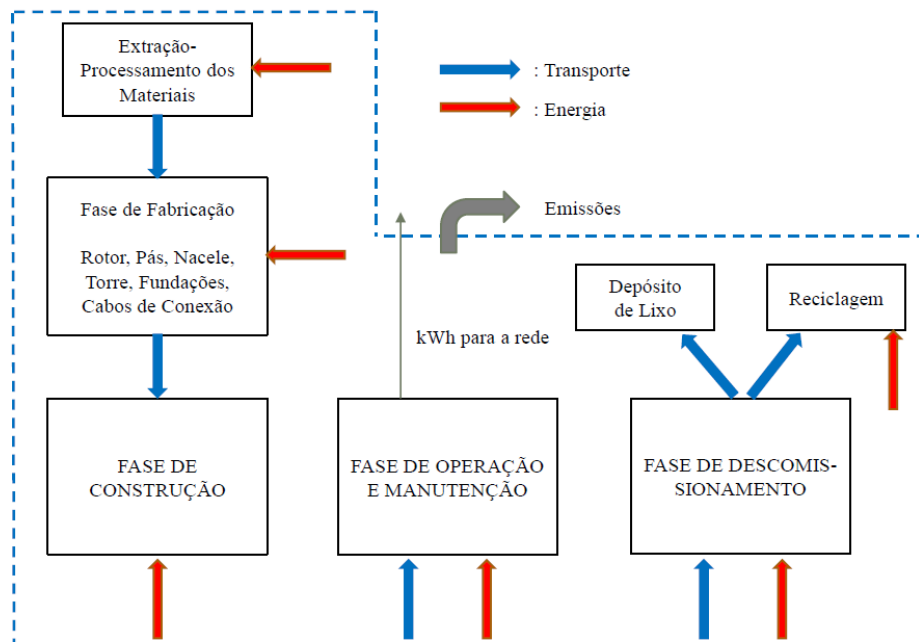


**Fonte: (ABEEólica, 2016).**

Mesmo a energia eólica sendo considerada uma energia limpa e que não emite GEE em sua operação, esta possui emissões que são chamadas de incorporadas nas fases de fabricação, transporte, montagem no local e manutenção dos geradores eólicos (KAUDELLIS, 2017).

A Figura 13 mostra um fluxograma que indica as fases de montagem de um aerogerador e as emissões incorporadas, começando pela fabricação com a produção dos principais componentes da turbina (rotor, nacele, torre), montagem e manutenção que inclui o transporte de pessoas e de peças, que utilizam combustíveis que produzem emissão, reparos e concertos que utilizam óleos, lubrificantes e desmontagem e remontagem das turbinas, entre outras operações, assim a montagem de um aerogerador eólico inclui uma energia que é chamada de incorporada e resulta em emissões, mesmo que pequenas.

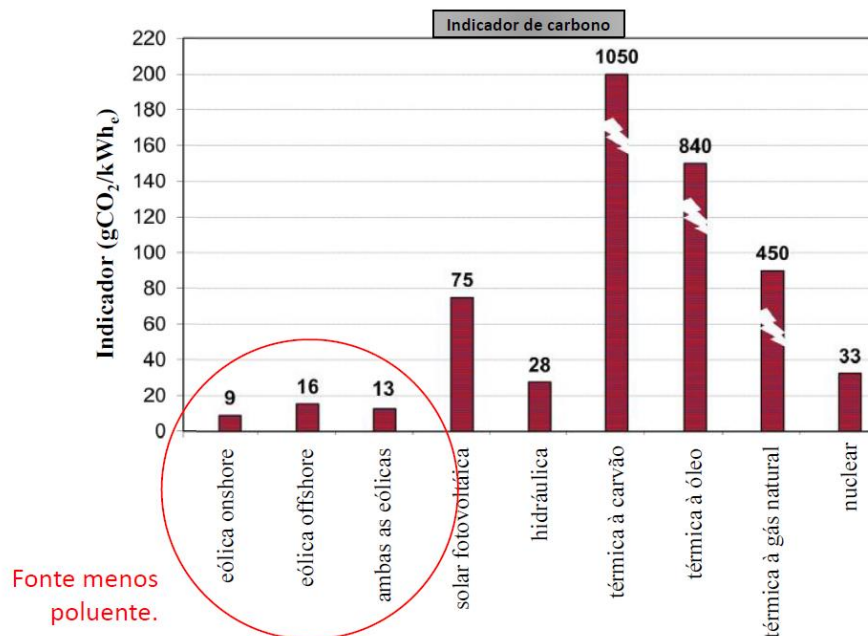
**Figura 13: Fluxograma de um ciclo de vida de um parque eólico.**



Fonte: (Adaptado de kaudellis, 2017)

Entretanto, em comparação à outras fontes, ela é a que polui menos, como pode ser visto na Figura 14.

**Figura 14. Indicadores de carbono incorporado.**



Fonte: (Adaptado de kaudellis, 2017)

### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para a realização do trabalho, a primeira etapa foi a determinação dos parâmetros de Weibull. Para isso, utilizou-se o valor médio anual da velocidade do vento e os valores dos fatores  $c$  (fator de escala) e  $k$  (fator de forma) de Weibull, todos cedidos pelo CRESESB (2015), a partir da localização geográfica. Em seguida, obteve-se a distribuição da frequência de Weibull  $f(v)$ , utilizando a Equação 9 (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001):

$$f(v) = k \frac{v^{k-1}}{c^k} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (9)$$

Logo após, obteve-se a curva de potência do aerogerador com as potências nominais fornecidas pelo fabricante (INC., 2011). O aerogerador escolhido foi o USA solar de eixo vertical que possui as características mostradas na Tabela 3.

**Tabela 3: Características do aerogerador escolhido.**

| Características             | Turbina USA solar |
|-----------------------------|-------------------|
| Potência Nominal (kW)       | 5                 |
| Velocidade Nominal (m/s)    | 16                |
| Velocidade de Partida (m/s) | 2                 |
| Área Varrida (m²)           | 5                 |

**Fonte: O Autor.**

Os dados obtidos da curva de potência ( $p(v)$ ) e a da frequência de Weibull ( $f(v)$ ) foram aplicados na Equação 12, para se determinar a produção anual de energia do aerogerador.

$$PAE = \frac{\sum p(v) \times f(v) \times 8760}{1000} [MW/h] \quad (12)$$

onde 8760 é o equivalente de horas no ano.

Em seguida, os dados de geração das fontes de energia do Brasil e os indicadores de emissão de  $gCO_2$  para cada fonte foram colhidos. A partir dessas informações foi estimado o total de  $gCO_2$  por cada KWh de energia gerada no Brasil, multiplicando-se a participação (em percentual) de cada fonte na produção de 1 KWh da matriz brasileira

(ANEEL, 2017) pelo indicador de gCO<sub>2</sub> de cada fonte ( $I_{gCO_2}$ ), e depois aplicando o somatório, conforme Equação 13.

$$Emiss\tilde{a}o_{gCO_2} = \sum Fonte * I_{gCO_2} \quad (13)$$

Calculou-se também o consumo de energia elétrica em Caraúbas, com os dados cedidos pela Neoenergia (2015). Para se obter o valor médio de consumo de energia elétrica por residência em Caraúbas, dividiu-se o consumo residencial pela quantidade de clientes residenciais cadastrados na COSERN. A partir dessa informação, pode-se obter o consumo anual de energia elétrica da cidade de Caraúbas, considerando o número total de habitantes, e que cada residência abriga, em média, três moradores.

Para finalizar, foi estimado o quanto se reduz de emissão de GEE com a utilização de um aerogerador de pequeno porte. A partir do total de emissões para cada kWh de energia utilizada, e com o valor do consumo anual de energia elétrica da cidade, pode-se encontrar a quantidade de emissão de gCO<sub>2</sub> anual produzida. A partir da informação do quanto é emitido de GEE, e do quanto se reduz com a utilização de um aerogerador de pequeno porte, foram analisados quantas unidades seriam necessários para reduzir a emissão de GEE em 20%, 70% e 100%.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos seguindo a metodologia proposta.

### 4.1 Parâmetros de Weibull

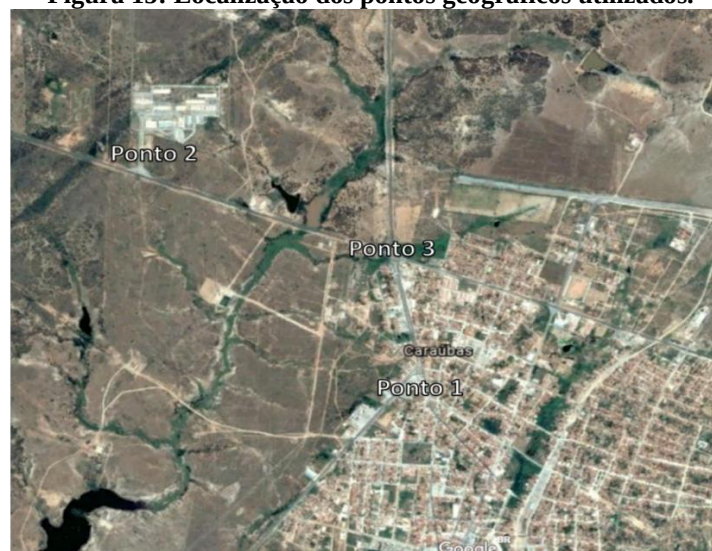
Os parâmetros de Weibull foram obtidos com o auxílio de uma ferramenta disponibilizada pelo CRESESB (2015), onde é possível a obtenção da velocidade média do vento, do fator  $c$ , do fator  $k$  e da densidade de potência por meio da localização geográfica. A localização de Caraúbas é  $5^{\circ}47'17''$  S e  $37^{\circ}33'22''$  O (Google Earth®). Assim, utilizou-se três coordenadas (Figura 15) próximas apresentadas na Tabela 4 afim de estimar um valor médio para os parâmetros de Weibull  $c$  e  $k$ . Os valores médios anuais obtidos foram  $c = 5,71$  m/s e  $k = 2,44$ .

**Tabela 4: Coordenadas geográficas dos três pontos.**

| Coordenada Geográfica                        | Fator 'c' (m/s) | Fator 'k' |
|----------------------------------------------|-----------------|-----------|
| $5^{\circ}47'17''$ S e $37^{\circ}33'22''$ O | 5,69            | 2,44      |
| $5^{\circ}46'19''$ S e $37^{\circ}34'13''$ O | 5,72            | 2,45      |
| $5^{\circ}46'49''$ S e $37^{\circ}33'38''$ O | 5,71            | 2,44      |
| MÉDIA                                        | 5,71            | 2,44      |

Fonte: O autor.

**Figura 15: Localização dos pontos geográficos utilizados.**

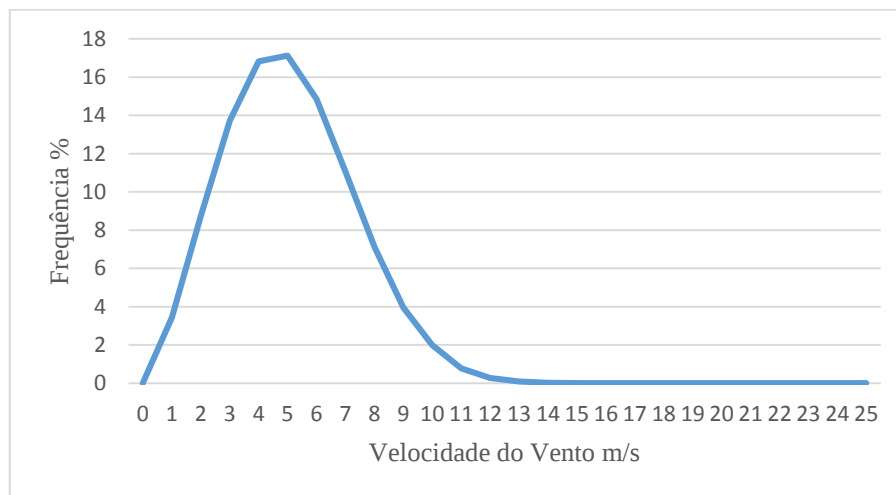


Fonte: (Google Earth®, 2017).

## 4.2 Distribuição da Frequência de Weibull

Para a determinação da frequência de Weibull ( $f(v)$ ), utilizou-se a Equação 1 com os valores médios anuais dos parâmetros  $c$  e  $k$  obtidos, e utilizando uma variação de velocidade de 0 a 25m/s. A distribuição da frequência de Weibull obtida é apresentada no Figura 16.

**Figura 16: Distribuição da Frequência de Weibull.**

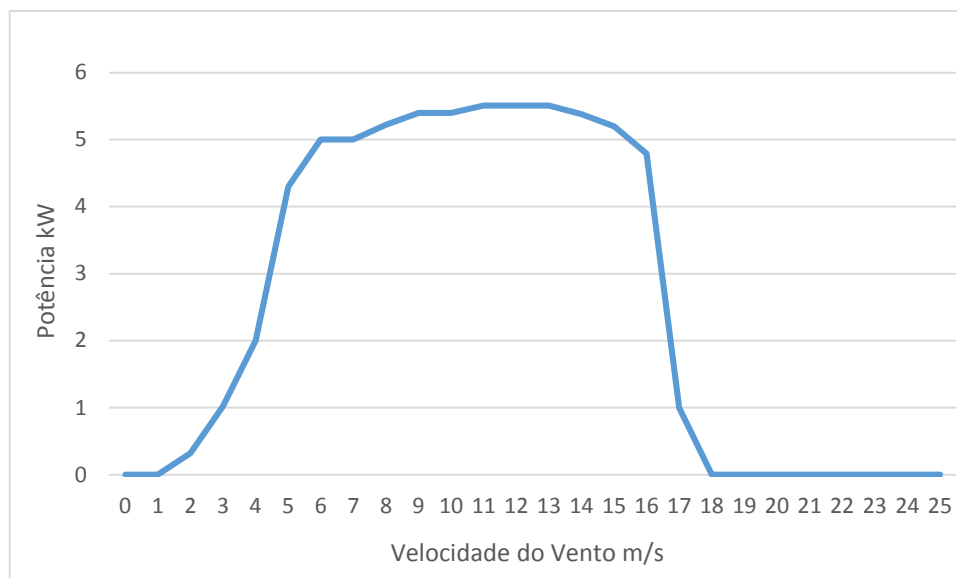


**Fonte: O Autor.**

## 4.3 Curva de Potência do Aerogerador

Para determinar a curva de potência utilizamos o aerogerador de eixo vertical USA solar, que segundo Pereira Junior (2015) em sua análise de aerogeradores de pequeno porte para as condições de vento de Caraúbas-RN foi a que obteve o melhor resultado. Com base nos dados de potência produzida fornecidos pelo fabricante (INC., 2011), pode-se obter a curva de potência do USA solar mostrada na Figura 17.

**Figura 17: Curva de Potência do USA solar.**



**Fonte: O Autor.**

Na Tabela 5 constam as potências da máquina, para uma variação de velocidade de 0 a 25m/s, informadas pelo fabricante.

**Tabela 5: Frequência de Weibull e Potência do Aerogerador USA solar.**

| Velocidade (m/s) | Frequência de Weibull (%) | Potencia Nominal (kW) |
|------------------|---------------------------|-----------------------|
| 0                | 0                         | 0                     |
| 1                | 3,43                      | 0                     |
| 2                | 8,73                      | 0,32                  |
| 3                | 13,73                     | 1,02                  |
| 4                | 16,82                     | 2                     |
| 5                | 17,12                     | 4,3                   |
| 6                | 14,85                     | 5                     |
| 7                | 11,07                     | 5                     |
| 8                | 7,12                      | 5,22                  |
| 9                | 3,95                      | 5,4                   |
| 10               | 1,99                      | 5,4                   |
| 11               | 0,78                      | 5,51                  |
| 12               | 0,27                      | 5,51                  |
| 13               | 0,08                      | 5,51                  |
| 14               | 0,02                      | 5,38                  |
| 15               | 0                         | 5,2                   |
| 16               | 0                         | 4,79                  |
| 17               | 0                         | 1                     |

|    |   |   |
|----|---|---|
| 18 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 0 |

Fonte: O Autor

#### 4.4 Produção Anual de Energia com o Aerogerador

Com os resultados obtidos anteriormente e o uso da Equação 2, obteve-se a PAE no valor de 28.840,1 kWh de geração de energia anual pelo aerogerador.

#### 4.5 Emissão de CO<sub>2</sub> da Matriz Energética do Brasil

A matriz energética brasileira em maio de 2017, segundo a Aneel (2017), conta com as correspondentes fontes de energia e as porcentagens mostradas na Tabela 6. De acordo com Kaudellis (2017) os indicadores de gCO<sub>2</sub>/kWh emitidos por cada fonte de energia da matriz brasileira apresentam os valores apresentados na Tabela 6. O indicador de carbono da biomassa é considerado 0, pois as emissões de carbono por essa fonte são praticamente nulas, por ser um ciclo fechado, ou seja, as emissões são absorvidas pela planta durante seu processo de crescimento (ANEEL, 2008).

Com base nos indicativos da Tabela 6, podemos encontrar o total de 138,34 gCO<sub>2</sub> por cada kWh de energia gerada no Brasil.

**Tabela 6: Quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> no cenário nacional.**

| Fontes de Energia     | $I_{gCO_2}$ (gCO <sub>2</sub> /kWh) | Fonte (%) | Fonte* $I_{gCO_2}$ |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------|--------------------|
| Biomassa              | 0                                   | 0,0892    | 0                  |
| Eólica                | 13                                  | 0,0642    | 0,8346             |
| Hidráulica            | 28                                  | 0,659     | 18,452             |
| Nuclear               | 33                                  | 0,0123    | 0,4059             |
| Solar fotovoltaica    | 75                                  | 0,0002    | 0,015              |
| Térmica a carvão      | 1050                                | 0,0235    | 24,675             |
| Térmica a gás natural | 450                                 | 0,0856    | 38,52              |
| Térmica a óleo        | 840                                 | 0,066     | 55,44              |
| TOTAL                 |                                     | 1         | 138,3425           |

Fonte: O Autor.

#### 4.6 Consumo Anual de Energia Elétrica da Cidade de Caraúbas-RN

Com os valores apresentados na Tabela 7 tendo sido obtidos junto à Neoenergia (2017), pode-se calcular o consumo de energia elétrica médio por residência, por meio da divisão do consumo residencial pela quantidade de clientes residenciais da COSERN. Assim, obtém-se o valor aproximado de 1.724 kWh de consumo por residência.

O IBGE (2017) estima a população de Caraúbas em 2016 em 20.636 habitantes. Dessa forma, considerado um valor médio de três pessoas por residência, pode-se estimar o consumo residencial anual dos habitantes de Caraúbas em 11.858.821 kWh.

**Tabela 7: Consumo e Número de consumidores de 2016 do RN.**

| <b>Classe</b> | <b>Consumo (MWh)</b> | <b>Clientes</b> |
|---------------|----------------------|-----------------|
| Residencial   | 2.082.288            | 1.207.951       |
| Industrial    | 1.248.816            | 92.919          |
| Comercial     | 1.090.260            | 62.408          |
| Rural         | 434.801              | 1.387           |
| Outras        | 726.281              | 22.190          |
| Total         | 5.582.446            | 1.386.855       |

**Fonte: O Autor.**

#### 4.7 Análise da redução de GEE pelo uso do Aerogerador

Com o valor total de emissão de 138,34 gCO<sub>2</sub> encontrado para cada kWh de energia gerada no Brasil e o valor de 11.858.821 kWh de consumo anual pela cidade de Caraúbas, podemos encontrar a quantidade de 1.640,55 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas anualmente. Temos também que o aerogerador estudado produz 28.840,1 kWh por ano, representando assim uma redução de 3,61 toneladas de CO<sub>2</sub> anuais, já considerando as emissões que o próprio aerogerador produz. Comparando as 3,61 toneladas de CO<sub>2</sub> que são reduzidas com as 1.640,55 toneladas emitidas, estimamos que um aerogerador reduziria em 0,22% da emissão de CO<sub>2</sub> anual de Caraúbas.

Podemos estimar que para termos uma redução de 20% das emissões de CO<sub>2</sub> na cidade de Caraúbas, precisaríamos utilizar 91 aerogeradores do tipo USA solar. Para uma redução de 70% nas emissões seria necessário um total de 319 aerogeradores. Já para a redução de 100% da emissão de CO<sub>2</sub> em Caraúbas-RN, seriam necessários 455 aerogeradores.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo fazer uma análise de redução de GEE com a utilização de aerogerador de pequeno porte na geração distribuída, e assim concluímos que para as condições de vento na cidade de Caraúbas o uso de um aerogerador de eixo vertical USA solar reduziria em 0,22% na emissão de CO<sub>2</sub> da cidade. Pode-se concluir também que para se ter uma redução de 100% da emissão de CO<sub>2</sub> na cidade de Caraúbas, precisaríamos instalar 455 aerogeradores USA solar de eixo vertical.

Assim percebemos que a inserção da geração distribuída de pequeno porte por meio de fonte de energia limpa se mostra favorável na cidade de Caraúbas, que mostrou bons resultados nos parâmetros do vento e na máquina analisados.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABEEÓLICA, Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Anual de Geração Eólica 2016**. 2016. Disponível em: <[http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/05/424\\_Boletim\\_Anual\\_de\\_Geracao\\_Eolica\\_2016\\_Alta.pdf](http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/05/424_Boletim_Anual_de_Geracao_Eolica_2016_Alta.pdf)>. Acesso em: 10 maio 2017.

ANEEL **Micro e Minigeração Distribuída**. Ed.2. Brasília. Aneel, 2016. p.79-82.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2008. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2017.

ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil: Fontes de Energia**. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

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

CRESESB. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. 2008. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)>.

CRESESB. **Potencial Eólico: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2015. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico)>. Acesso em: 18 abr. 2017.

CRESESB. **Tutorial de Energia Eólica**. 2017. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=tutorial\\_eolica](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_eolica)>. Acesso em: 10 maio 2017.

CRUZ, Daniel Tavares. **MICRO E MINIGERAÇÃO EÓLICA E SOLAR NO BRASIL: PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTO DO SETOR**. 2015. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Cap. 7.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **ENERGIA EÓLICA: PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás, 2009. 280 p.

ENERGIA, Portal. **Componentes e aplicações de um Sistema Micro-Eólico**. 2010. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/componentes-e-aplicacoes-de-um-sistema-micro-eolico/>>. Acesso em: 05 maio 2017.

FÁCIL, Eólica. **Turbinas eólicas de eixo vertical:** A turbina eólica de eixo vertical possui o eixo de rotação perpendicular ao solo. 2017. Disponível em: <<https://www.eolicafacil.com.br/eixo-vertical>>. Acesso em: 10 maio 2017.

GOOGLE. **Google Earth.** Versão 9.0.32.1. 2017. Nota (Caraúbas-RN). Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@5.77438507,37.58797815,140.89658553a,92525.24958361d,35y,-0h,0t,0r>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

GWEC. **Strong Outlook for Wind Power.** 2017. Disponível em: <<http://myemail.constantcontact.com/StrongOutlookforWindPower.html?soid=1102949362881&aid=SM6Rjo6BDjo>>. Acesso em: 01 maio 2017.

IBGE. **Rio Grande do Norte:** Caraúbas. 2016. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/8KO>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

IDEAL. **Como faço para ter energia eólica em minha casa?** 2014. Disponível em: <<http://institutoideal.org/guiaeolica/>>. Acesso em: 05 maio 2017.

INC., USA Solar & Wind. **5 KW VAWT.** 2011. Disponível em: <[http://www.usasolarwind.com/\(VAWT\)VerticalAxisWindTurbines/VAWT5kw.jpg](http://www.usasolarwind.com/(VAWT)VerticalAxisWindTurbines/VAWT5kw.jpg)>. Acesso em: 18 abr. 2017.

KALDELLIS, J.K. Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy: Comparison with onshore counterpart. **Elsevier.** [s.l.], p. 72-84. 16 February 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.039>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Eólica.** 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012. 366 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Energia Eólica no Brasil e Mundo.** 2014. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256600/Folder+Energia+Eolica.pdf/b1a3e78c-7920-4ae5-b6e8-7ba1798c5961>>. Acesso em: 22 dez. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Assessoria de Comunicação Social. **Matriz energética de 2016 terá maior participação das energias renováveis.** 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 12 maio 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **DEA 26/14:** Eficiência Energética e Geração Distribuída. 1 ed. Rio de Janeiro: Epe, 2014. 78 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/SérieEstudosdeEnergia/DEA26EficienciaEnergeticaeGeracaoDistribuıdaparaosproximos10anos.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2017.

NEOENERGIA, Cosern. **Consumo de energia elétrica cresceu 1,28% no RN em 2016**. 2017. Disponível em: <<http://www.cosern.com.br/Noticias/Pages/Consumo-de-energia-elétrica-cresceu-1,28-no-RN-em-2016.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

PEREIRA JUNIOR, Carlos Antonio da Rocha. **Análise comparativa entre aerogeradores de eixo horizontal e vertical de pequeno porte para as características de vento de Caraúbas**. 2015. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, UFERSA, Caraúbas, 2015. Cap. 5.

PEREIRA, Marcio Giannini; MONTEZANO, Bruno E. M.; DUTRA, Ricardo Marques. **MERCADO DE ENERGIA EÓLICA DE PEQUENO PORTE NO BRASIL: PERCEPÇÃO DO POTENCIAL CONSUMIDOR. Brazil Windpower 2015**. Rio de Janeiro, p. 1-10. set. 2015. Disponível em: <[http://www2.ctee.com.br/brazilwindpower/2015/papers/Marcio\\_Giannini\\_Pereira.pdf](http://www2.ctee.com.br/brazilwindpower/2015/papers/Marcio_Giannini_Pereira.pdf)>. Acesso em: 05 maio 2017.

PUCP, Estación Meteorológica Hipólito Unánue. **Equipos para viento**. 2017. Disponível em: <<http://meteorologia.pucp.edu.pe/estacion/beviento.html>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SILVA, Augusto Antônio Coutinho et al. In: IX CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2016, Fortaleza. **ANÁLISE DAS ATUAIS POLÍTICAS DE INCENTIVO À MINI E MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA E DA CERTIFICAÇÃO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE NO BRASIL**. Fortaleza: ABCM, 2016. p. 1 - 10.

SILVA, Elaine Priscila Fontes da. **O CONCEITO DE SMART GRID COMO FOMENTADOR DA GERAÇÃO EÓLICA DISTRIBUÍDA**. 2016. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Campus Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Caraúbas, 2016.