

*UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS*

GEOVANE BENEDITO VISSOTO

***VIABILIDADE TÉCNICA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COM O USO DE MICROGERADORES EÓLICOS***

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

*CURITIBA
2016*

GEOVANE BENEDITO VISSOTO

**VIABILIDADE TÉCNICA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COM O USO DE MICROGERADORES EÓLICOS**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista no curso de Pós-Graduação em Energias Renováveis na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Esp. Luiz Fernando Ortega

CURITIBA
2016

TERMO DE APROVAÇÃO

GEOVANE BENEDITO VISSOTO

VIABILIDADE TÉCNICA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM O USO DE MICROGERADORES EÓLICOS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 13 de dezembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Luiz Fernando Ortega
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
UTFPR

Prof. Ms. Ubirajara Zoccoli
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter me proporcionado força e determinação para chegar até aqui, que mesmo passando por momentos difíceis me manteve de pé para alcançar meu objetivo.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e aos seus docentes pelo excelente ensino, o que me possibilitou um grande aprendizado.

Ao Professor Luiz Fernando Ortega pela orientação deste trabalho e por todo o incentivo que me foi dado. Agradeço também pelos ensinamentos transmitidos, que tanto contribuíram para a minha especialização.

Ao pessoal da divisão de monitoramento da qualidade do ar do Instituto Lactec pela colaboração com fornecimento de dados dos anemômetros.

Agradeço a minha família, meus pais, minha esposa e meu filho pelo carinho, compreensão e pela grande motivação nessa importante fase da minha vida.

Agradeço aos meus amigos também pelo apoio e motivação, aos colegas de sala de aula, que compartilharam as dificuldades do curso, as realizações, e a todos que me acompanharam nesta caminhada.

Ventos Promissores

*O mesmo vento que sopra
Fazendo um veleiro navegar
Também movimenta a turbina
Para a energia gerar*

*Esse vento sopra forte
Vem de toda direção
Melhorando a eficiência
Aumentando a geração*

*Gira a pá, gira a turbina
Que com o gerador tem sintonia
Cinética, mecânica e elétrica
São as formas de energia*

*Com o acréscimo da demanda
A tecnologia avança mais
Aproveitando da melhor forma
Nossos recursos naturais*

*São sistemas de um processo
Para um futuro sustentável
Gerando um desenvolvimento
Com energia renovável!*

RESUMO

VISSOTO, Geovane Benedito. **Viabilidade técnica na geração de energia elétrica com o uso de microgeradores eólicos**. 2016. 52 f. Monografia de Especialização em Energias Renováveis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O presente trabalho tem como objetivo mostrar como é uma microgeração de energia elétrica derivada do potencial eólico, suas vantagens e desvantagens e normas para sua utilização. Apresentando abordagem teórica, complementada por pesquisa de campo com auxílio de órgãos competentes nas informações referentes à medição de ventos na cidade de Araucária, região metropolitana de Curitiba. O presente cenário no âmbito econômico e de geração de energia elétrica propicia o incentivo de aplicação de conceitos de geração elétrica residencial. Devido às mudanças climáticas, os reservatórios das usinas hidrelétricas acabam não tendo condições de manter o mesmo volume em determinados períodos do ano, reduzindo as vazões para as turbinas, fazendo com que a potência injetada no sistema seja insuficiente para suprimento do consumo de energia. Aliado a esse fato, tem-se também a crescente demanda no consumo de energia elétrica, com isso há a necessidade de buscar fontes alternativas de energia, que contribuam para o desenvolvimento sustentável, possibilitando ao consumidor ter a sua própria geração de energia elétrica. Com o aumento da preocupação com as questões ambientais e a segurança energética, as fontes renováveis de energia têm assumido um papel cada vez mais importante na matriz energética. Em meio a essas fontes, a utilização de energia eólica é crescente, como um tipo de energia diferenciado dos demais e que vem indicando resultados satisfatórios, mas para isso é necessário um estudo específico aprofundado da região onde será instalada a microgeração.

Palavras-chave: Aerogeradores. Energia Eólica. Fontes Renováveis. Microgeração. Turbina.

ABSTRACT

VISSOTO, Geovane Benedito. **Technical feasibility in electricity generation using wind microgenerators**. 2016. 52 p. Monografia de Especialização em Energias Renováveis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The present work aims to show how a micro-generation of electricity derived from wind power potential, its advantages and disadvantages and guidelines for their use. Showing theoretical approach, complemented by field research with the help of competent bodies in information regarding measurement of winds in the city of Araucária, Curitiba metropolitan region. The present scenario in the context of electric power generation provides the incentive to apply concepts of residential electric generation. Due to climate change, the reservoirs of hydroelectric plants end up not having policies to maintain the same volume in certain periods of the year, reducing the flow to the turbines, causing the power injected into the system is insufficient to supply the energy consumption. Allied to this fact, there is also the growing demand for consumption of electric power, with that there is the need to seek alternative sources of energy which contribute to sustainable development, enabling the consumer to have its own electric power generation. With increasing concern about environmental issues and energy security, renewable energy sources have assumed an increasingly important role in the energy matrix. In the midst of these sources, the use of wind power is growing, as a kind of differentiated energy from others and indicating satisfactory results, but this requires a specific in-depth study of the region where it will be installed Microgeneration.

Keywords: Wind Turbines. Wind Energy. Renewable Sources. Microgeneration. Turbine.

LISTA DE SIGLAS

<i>ABEEÓLICA</i>	<i>Associação brasileira de energia eólica</i>
<i>ANEEL</i>	<i>Agência nacional de energia elétrica</i>
<i>CEPEL</i>	<i>Centro de pesquisas de energia elétrica</i>
<i>COPEL</i>	<i>Companhia paranaense de energia</i>
<i>CRESESB</i>	<i>Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito</i>
<i>EPE</i>	<i>Empresa de pesquisa energética</i>
<i>INMETRO</i>	<i>Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia</i>
<i>MMA</i>	<i>Ministério do Meio Ambiente</i>
<i>MME</i>	<i>Ministério de Minas e Energia</i>
<i>PRODIST</i>	<i>Procedimentos de distribuição</i>
<i>TEEH</i>	<i>Turbinas eólicas de eixo horizontal</i>
<i>TEEV</i>	<i>Turbinas eólicas de eixo vertical</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Distribuição geral dos ventos</i>	20
<i>Figura 2 - Potencial eólico estimado</i>	21
<i>Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal</i>	26
<i>Figura 4 - Componentes de uma turbina eólica de eixo vertical</i>	27
<i>Figura 5- Limite de Betz</i>	28
<i>Figura 6- Configuração de um sistema isolado</i>	30
<i>Figura 7- Configuração de um sistema interligado à rede</i>	32
<i>Figura 8 - Configuração de um sistema híbrido</i>	32
<i>Figura 9 - Estação Automática Assis Araucária</i>	35
<i>Figura 10 - Coordenada Geográfica</i>	37

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1- Dados de ventos 50 m</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 2- Distribuição de Weibull 2013.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 3 - Distribuição de Weibull 2014.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 4 Distribuição de Weibull 2015.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 5 Descrição técnica aerogerador.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 6 Energia gerada em 2013.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 7 Energia gerada em 2014.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 8 Energia gerada em 2015.....</i>	<i>49</i>

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Distribuição de Weibull	29
Gráfico 2- Velocidade média dos ventos (2013).....	35
Gráfico 3- Velocidade média dos ventos (2014).....	36
Gráfico 4- Velocidade média dos ventos (2015).....	36
Gráfico 5- Velocidade Média Sazonal dos ventos a 50 m de altura	38
Gráfico 6 - Histograma 2013	42
Gráfico 7 - Histograma 2014	43
Gráfico 8 - Histograma 2015	44
Gráfico 9 - Curva de potência.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS	13
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos Específicos	14
1.5 JUSTIFICATIVA	14
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO	16
1.8 ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MICROGERAÇÃO	18
2.1.1 Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras	19
2.1.2 Geração compartilhada	19
2.1.3 Autoconsumo Remoto	19
2.2 A ENERGIA EÓLICA	19
2.2.1 Tipos de ventos	20
2.2.2 Potência do Vento	21
2.2.3 Energia produzida pelo aerogerador	23
2.2.4 Fator de capacidade	23
2.3 AEROGERADORES	23
2.3.1 Turbina eólica de eixo horizontal (TEEH)	25
2.3.2 Turbina eólica de eixo vertical (TEEV)	26
2.4 LIMITE DE BETZ	27
2.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	28
2.6 TIPOS DE SISTEMAS EÓLICOS	29
2.6.1 - Sistemas isolados	30
2.6.2 - Sistemas interligados à rede	30
2.6.3 - Sistemas híbridos	32
2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS	33
2.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS	33
3 DESENVOLVIMENTO	34
3.1 ESTUDO DO LOCAL A SER INSTALADO O MICROGERADOR	34
3.2 VIABILIDADE TÉCNICA	40
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será relatada uma abordagem ao tema em questão, além de explanar sobre os problemas e premissas, objetivo geral e específico, justificativa e procedimentos que serão utilizados na elaboração do trabalho.

1.1 TEMA

A utilização de energia elétrica é imprescindível para o desenvolvimento, o cenário econômico depende diretamente da produção de energia elétrica.

Segundo dados preliminares do Balanço Energético Nacional de 2016, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2015 as fontes renováveis representam 75,5% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 21.626 GWh em 2015, equivalente a um aumento de 77,1% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 12.210 GWh.

Um sistema de geração de energia eólica pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas interligados à rede e sistemas híbridos, neste estudo será analisado o sistema interligado de um microgerador eólico, uso residencial, com a rede elétrica.

A obtenção de dados adequados e confiáveis determinam investimentos em qualquer área, e no setor elétrico não é diferente. Este estudo vem auxiliar no preenchimento desta lacuna, apresentando informações sobre a região estudada e suas principais características, tais como velocidade dos ventos, análise de custos de equipamentos utilizados na microgeração, informações técnicas quanto à potência elétrica e arranjo físico dos equipamentos.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Para a análise em questão, será considerado o sistema de microgeração eólica em uma localidade na cidade de Araucária – PR no modelo interligado, pois o mesmo tem a vantagem de não requerer baterias visto que a rede da concessionária é utilizada nos momentos em que não há geração local ou a geração é insuficiente. Utilizando-se de dados de anemômetros instalados a uma altura de aproximadamente 10 metros e situados em ambiente urbano, espera-se uma análise mais confiável sobre o sucesso do projeto.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Com o aumento da demanda no consumo de energia elétrica e o número limitado de fontes geradoras no Brasil, cria-se uma demanda por fontes alternativas de geração elétrica para contribuir com a economia e o desenvolvimento sustentável do país. Destaca-se que usinas hidroelétricas existentes não conseguem suprir a demanda energética de todo o país, podendo causar interrupção no fornecimento de energia elétrica e barrar o crescimento econômico. A oscilação na geração de energia causada pela freqüente falta de chuvas compromete ainda mais o processo.

Uma opção é utilizar a energia dos ventos como potencial energético para mover as pás de uma microturbina eólica. Para isso será necessário analisar a viabilidade da utilização de um microgerador eólico residencial, verificando a velocidade média dos ventos no local a ser instalado com o auxílio de um anemômetro e, verificando a viabilidade técnica da instalação.

A energia elétrica influencia o desenvolvimento do país e, para permitir um crescimento econômico sem prejudicar o meio ambiente, é necessário estar sempre em busca de tecnologias limpas, ecologicamente sustentáveis e com eficiência energética.

1.4 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivos os tópicos a seguir:

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo estudar a viabilidade técnica na geração de energia elétrica com o uso de microgeradores eólicos para uso residencial.

1.4.2 Objetivos Específicos

- *Levantar dados referentes à intensidade do vento do local estudado;*
- *Comparar o potencial do vento na região metropolitana (Araucária – PR) com estações automáticas e dados do Atlas eólico;*
- *Estudar a viabilidade técnica da utilização de um microgerador eólico na região de Araucária-PR;*
- *Dimensionar um sistema de microgeração eólica para aplicação residencial.*

1.5 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento econômico do Brasil surge a necessidade de adequação e expansão da matriz energética, uma vez que a ampliação desta exerce influência direta sobre o desenvolvimento do país. Para permitir um crescimento econômico sem prejuízos ao meio ambiente, buscam-se tecnologias limpas, sustentáveis e eficientes.

Segundo pesquisa sobre o consumo de energia no Brasil, publicada pela EPE, em relação às tendências gerais de consumo de energia elétrica, afirma que:

[...] o Brasil teve ganhos de eficiência energética em alguns setores da economia, embora a intensidade energética total tenha se elevado nas últimas décadas, devido ao setor industrial. A análise do setor residencial permite um diagnóstico interessante que associa a eficiência energética à

melhoria de serviços energéticos, tornando o setor residencial o quarto setor econômico em termos de maior demanda de energia em 2010 (EPE, Consumo de Energia no Brasil, 2014, p. 80).

Sobre o significativo crescimento no consumo de eletricidade residencial a EPE afirma que:

Nos últimos 22 anos o consumo de eletricidade residencial mais que duplicou (140% de elevação). Entre 2001 e 2012, cresceu a uma taxa média de 4,1% ao ano, devido a elevada aquisição de diversos eletrodomésticos pelas famílias brasileiras, além do aumento da quantidade de horas de uso dos mesmos, o que impactou diretamente o consumo elétrico residencial (EPE, Consumo de Energia no Brasil, 2014, p. 82).

Dados como esses viabilizam estudos sobre a utilização de microgeradores eólicos residenciais, possibilitando ao consumidor residencial ter sua própria fonte de energia elétrica. Busca-se com essa pesquisa, analisar a viabilidade da utilização de um microgerador eólico, onde a energia dos ventos é usada como potencial energético para mover as pás de uma microturbina eólica, trabalhando em paralelo com a concessionária local, fornecendo ao sistema a energia excedente, não sobrecarregando a matriz energética.

O estudo de viabilidade técnica para uma instalação do sistema de energia eólica conectada à rede elétrica evidenciará o potencial da intensidade dos ventos para o uso de energia renovável em residências, contribuindo assim para o estudo de novos projetos alternativos de geração de energia elétrica e diversificação da matriz energética.

A microgeração pode reduzir custos, melhorar a confiabilidade e reduzir o impacto ambiental provocado por usinas de grande porte. Com a utilização da microgeração se tem uma economia em investimentos, alívio no congestionamento nas linhas de transmissão, melhoria no perfil de tensão e na estabilidade do sistema, além de redução de custos em eletricidade para o consumidor final.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Trata-se de um estudo bibliográfico e pesquisa qualitativa, que busca verificar levantamentos de dados de coleta em anemômetros instalados em Araucária-PR, por meio de órgão de pesquisa, de modo a verificar a viabilidade do projeto na região em questão. Para realização deste projeto de pesquisa foi

analisada a velocidade média de ventos em quais locais têm maior incidência, e probabilidade de obter sucesso na aplicação.

Foram coletados dados fornecidos pela divisão de monitoramento da qualidade do ar, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), o qual é referência nacional em monitoramento da qualidade do ar, por meio de suas estações de monitoramento em uma altura próxima dos 10 metros, e as disponíveis no atlas do potencial energético instalados em torres, com aproximadamente 50 metros de altura. Utilizando os dados do LACTEC, têm-se valores mais próximos aos que poderão ser encontrados para a instalação de microgeração eólica em residências.

Com a previsão da geração de energia elétrica do sistema, será dimensionado o aerogerador. Após a coleta de dados de intensidade dos ventos no local da instalação, será realizado cálculo de potência do vento para dimensionamento do aerogerador.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

O trabalho consiste em um levantamento de dados teóricos divididos em três etapas: Pesquisa teórica, coleta de dados e análise de dados. Com base neste documento norteador serão consultadas as velocidades dos ventos em cada mês do ano, sua sazonalidade, utilizando informações de anemômetros da região onde poderão ser instalados os microgeradores eólicos.

Na etapa inicial será executada uma coleta de dados da intensidade dos ventos em um anemômetro instalado em Araucária – PR, para verificar se possui capacidade de suprir um microgerador eólico e atender a demanda de energia elétrica de uma unidade consumidora, utilizando como referência Custódio (2009), Dorado (2013) e o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008).

1.8 ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS

No capítulo 1, apresenta-se uma introdução sobre o tema proposto, fazendo uma contextualização do assunto, delimitando a área de estudo e apontando os

problemas e premissas, bem como, os objetivos que devem ser atingidos com a realização do estudo.

No capítulo 2, aborda-se a fundamentação teórica, tipos de tecnologia para geração eólica, aerogeradores de eixo vertical e horizontal.

No capítulo 3, apresenta-se a análise e comparação dos dados de intensidade de vento obtidos no local estudado, e os cálculos para dimensionamento de um sistema de microgeração eólica.

No capítulo 4, relatam-se as conclusões e considerações finais, ponderando sobre os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo como Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), o território brasileiro tem capacidade para gerar até 140 gigawatts, mas uma pesquisa realizada em 2015 por uma das principais consultorias internacionais na área de energia eólica, o DEWI estima que o potencial eólico brasileiro pode ser superior a 500 GW em terra e 350 GW no mar, para projetos eólicos offshore em águas rasas. O potencial eólico brasileiro é mais que todo o potencial elétrico instalado no país atualmente. A previsão é que a participação da fonte de energia eólica na matriz energética brasileira continue crescendo, como vem acontecendo no resto do mundo, apresentando taxas de crescimento médias de potência instalada superiores a 20% ao ano.

2.1 MICROGERAÇÃO

Segundo a resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 687/2015 que altera a nº 482/2012, microgeração é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Essa resolução permitiu aos consumidores instalarem geradores de pequeno porte em suas unidades consumidoras e utilizar o sistema elétrico da concessionária para injetar o excedente de energia, que será convertido em crédito de energia válido por 60 meses. Estes créditos poderão ser utilizados para abater o consumo da própria unidade consumidora nos meses seguintes ou de outras unidades consumidoras que precisam estar previamente cadastradas para esse fim e atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo. Outra forma para adicionar unidades consumidoras para o abatimento do consumo é por meio de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras ou geração compartilhada.

2.1.1 Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras

Caracteriza-se pela utilização da energia elétrica de forma independente, onde cada fração com uso individualizado constitui uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituem uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento com microgeração, e as unidades consumidoras precisam estar localizadas na mesma propriedade.

2.1.2 Geração compartilhada

Caracteriza-se pela reunião de consumidores dentro da mesma área de concessão ou permissão, por consórcio ou cooperativa, podendo ser pessoa física ou jurídica, que possua instalação com microgeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

2.1.3 Autoconsumo Remoto

Caracterizado por unidades consumidoras de uma mesma pessoa jurídica, matriz e filial, ou pessoa física que possua unidade consumidora com microgeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão.

2.2 A ENERGIA EÓLICA

Segundo a ANEEL, denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade. A energia eólica tem sido utilizada desde a antiguidade para mover os barcos impulsionados por velas ou para fazer funcionar a engrenagem de moinhos ao mover as suas pás.

O aproveitamento da energia eólica no mundo está cada vez mais se consolidando como uma alternativa viável e limpa. Esse tipo de energia está

presente em matrizes energéticas de muitos países e, uma vez que os ventos oferecem uma opção de suprimento no setor energético, em conjunto com outras fontes renováveis, poderá conciliar as necessidades de uma sociedade industrial moderna com os requisitos de preservação ambiental, auxiliando no desenvolvimento sustentável e na redução do dióxido de carbono que seria emitido se fossem utilizadas outras fontes de geração de energia. Até a década de 70, os investimentos em tecnologias para geração de energia eólica eram pequenos, porém com a crise do petróleo na mesma década, o setor eólico industrial começou a crescer.

2.2.1 Tipos de ventos

Podendo ser constantes ou periódicos, resultam das diferenças de pressão atmosférica, onde os principais elementos que interferem em seu resultado são a temperatura e a altitude. Zonas de baixa altitude têm alta pressão atmosférica, enquanto zonas de elevada altitude possuem baixa pressão atmosférica.

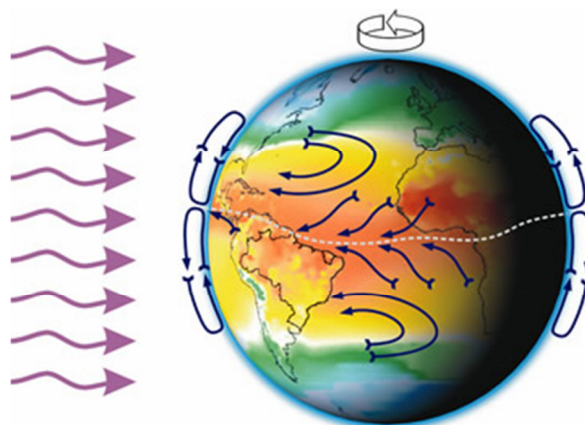


Figura 1 - Distribuição geral dos ventos
Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001

Os ventos alísios são movimentos constantes ou regulares de ar úmido dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes, provocando chuvas e calmarias ao longo da zona equatorial.

Ventos contra-alísios realizam o movimento contrário aos ventos alísios, direcionando-se da linha do equador aos trópicos, sendo geralmente ventos muito secos.

Os ventos periódicos ocorrem durante uma determinada estação do ano, sendo dois principais tipos: brisas e monções.

Brisas, podem ocorrer por efeitos do mar ou da terra. A que vem do mar para a terra chama-se de brisa marítima e ocorre durante o dia, a brisa terrestre ocorre durante a noite e seu processo é o inverso.

Monções sopram do mar para o continente e do continente para o mar, variando conforme as estações do ano.

2.2.2 Potência do Vento

De acordo com um estudo do Cepel e do Ministério de Minas e Energia (MME), o potencial eólico brasileiro é de 143,5 GW (Figura 2). O estudo levou em conta geradores de energia eólica de até 50 metros. Com o avanço tecnológico no setor, que permite geradores de até 80 metros atualmente no Brasil, o potencial cresceria mais ou menos 50%.

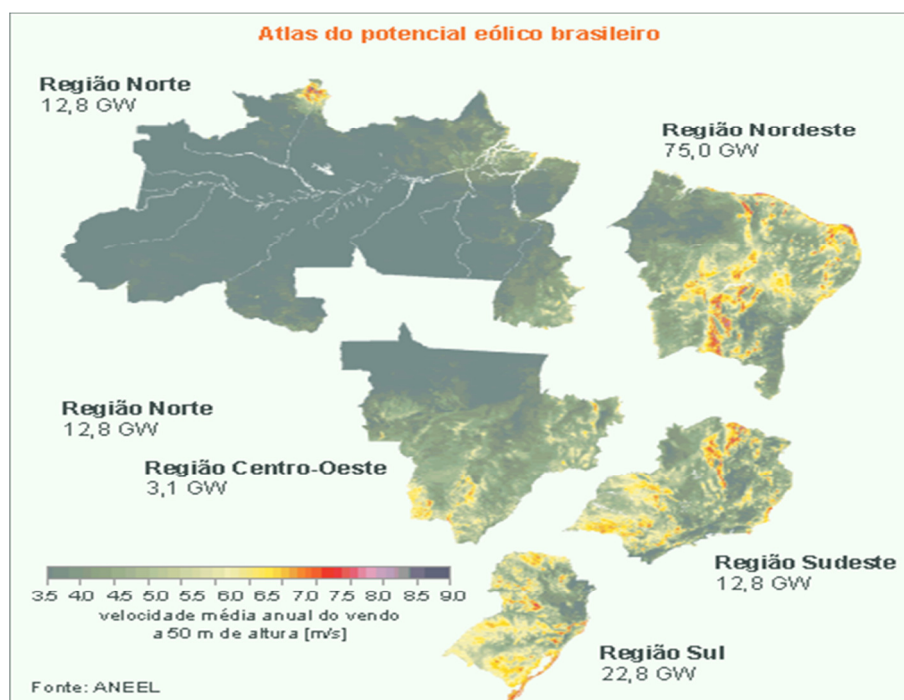


Figura 2 - Potencial eólico estimado
Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001

A potência disponível no vento pode ser calculada e é função da velocidade que incide no gerador, a área do rotor e a massa específica do ar, portanto a potência do vento (1) pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

P = Potência do evento (W)
 ρ = Massa específica do ar (kg/m^3)
 A = Área de seção transversal do rotor (m^2)
 v = Velocidade do vento (m/s)

Segundo Custódio, 2009, nem toda a energia do vento pode ser transformada em energia elétrica, pois para haver uma eficiência de 100% a velocidade do ar após a turbina deveria ser igual a zero, porém isto não é possível. Portanto esta parcela, em uma turbina eólica ideal, representa 16/27 da potência total, sendo este valor dado pela Lei de Betz. Portanto, tem-se a potência máxima (2) de uma turbina eólica dada como:

$$P \text{ máx} = \frac{16}{27} P \quad (2)$$

Onde:

$P \text{ máx}$ = Potência máxima (W)
 P = potência do vento (W)

Este valor de potência máxima só é possível em uma turbina ideal, por isto tem-se o coeficiente de potência (3), que representa a relação entre a potência extraída e a potência disponível. Com isto o coeficiente de potência C_P é dado por:

$$C_p = \frac{PE}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (3)$$

Onde:

C_p = Coeficiente de potência
 PE = Potência extraída da turbina (W)
 ρ = Massa específica do ar (kg/m^3)
 A = Área de seção transversal do rotor (m^2)
 v = Velocidade do vento (m/s)

2.2.3 Energia produzida pelo aerogerador

Cada aerogerador possui uma curva de potência, que representa a quantidade de potência que é convertida para cada velocidade de vento. Para que seja possível calcular a energia gerada em certo intervalo de tempo (4) deve-se utilizar a integral da potência no intervalo de tempo:

$$E = \int_0^t P(v(t))dt \quad (4)$$

Onde:

E = Energia gerada no intervalo de tempo t

$P(v(t))$ = Potência em função da velocidade do vento (retirado da curva de potência)

2.2.4 Fator de capacidade

Para a seleção do aerogerador mais adequado, um ponto importante é o fator de capacidade (5) da turbina, que é dado por:

$$FC = \frac{E_p}{E_n} \quad (5)$$

Onde E_p é a energia pretendida, que depende da distribuição dos ventos no local e das características do equipamento, e E_n é a energia que seria gerada pela máquina no mesmo intervalo de tempo trabalhando em sua potência nominal. Este valor, segundo Petry e Mattuella, 2007, pode ser considerado como o indicativo de qualidade do projeto em termos de potencial eólico e eficiência de instalação do aerogerador selecionado.

2.3 AEROGERADORES

Os geradores eólicos ou aerogeradores são máquinas capazes de transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica. A energia cinética é convertida em energia mecânica rotacional pela turbina eólica. Essa energia mecânica é transmitida pelo eixo por meio de uma caixa de engrenagens ou

diretamente ao gerador, que realiza a conversão eletromecânica, produzindo energia elétrica.

O vento se origina devido a diferentes fatores, mas basicamente consiste no equilíbrio de pressões, pois devido à variação de incidência de sol conforme o pontono globo há diferenças de temperatura, e isso gera movimentos de ar que também são afetados pelo movimento de rotação da terra. Esses movimentos significam energia cinética, as pás da turbina são projetadas para capturar essa energia contida no vento, quando essas pás começam a se mover, elas acionam um eixo que une o cubo do rotor a um gerador e, esse gerador é quem vai transformar essa energia em eletricidade. A maioria das turbinas eólicas tem 3 pás, no entanto o mais importante não é o número de pás, mas sim a superfície varrida por estas. Assim, uma turbina eólica com apenas 2 pás pode ter a mesma eficiência que uma turbina eólica de 3 pás. A dimensão das turbinas eólicas depende sobretudo da potência desejada, quanto mais elevada for a potência desejada da turbina eólica, maior esta deverá ser.

- *Densidade do ar*

Densidade do ar é a massa por unidade de volume da atmosfera da Terra, é o peso do ar, segundo sua distribuição e quantidade. Com o aumento da altura, a tendência da densidade do ar é diminuir, quanto maior a densidade do ar, maior a quantidade de energia que a turbina poderá receber.

- *Área de varrimento do rotor*

A capacidade de captar a energia do vento pela turbina eólica é determinada pela área de varrimento do rotor. Como a área do rotor aumenta com o quadrado do raio, caso uma turbina seja duas vezes maior receberá quatro vezes mais energia.

- *Distribuição da pressão no rotor:*

Na medida em que o vento se aproxima do rotor a pressão do ar aumenta gradualmente, pois o rotor acaba atuando como barreira ao vento, e por trás dele a pressão cai imediatamente, à medida que se afasta ele vai se estabilizando. No momento em que o vento se afasta do rotor a turbulência provocará que o vento

mais lento se misture com o que estiver mais rápido na área circundante, reduzindo o efeito chamado de abrigo ao vento.

Quando se trata de turbinas eólicas modernas, há dois projetos principais: as de eixo horizontal (TEEH) e as de eixo vertical (TEEV).

2.3.1 Turbina eólica de eixo horizontal (TEEH)

O rotor da TEEH gira em torno de um eixo horizontal (Figura 3), e durante o trabalho o plano de rotação é vertical à direção do vento. As pás da turbina eólica são instaladas perpendicularmente ao eixo de rotação. O número das pás depende da intensidade dos ventos, a turbina eólica com mais pás é muitas vezes chamada como turbina de vento de baixa velocidade, a utilização de mais pás faz com que a turbina ganhe uma alta taxa de utilização do vento e um binário elevado. A turbina eólica com menos pás é muitas vezes apontada como turbina de vento de alta velocidade, e quando funciona em alta velocidade, ela ganha uma alta proporção de utilização do vento, mas a velocidade do vento de partida deve ser elevada.

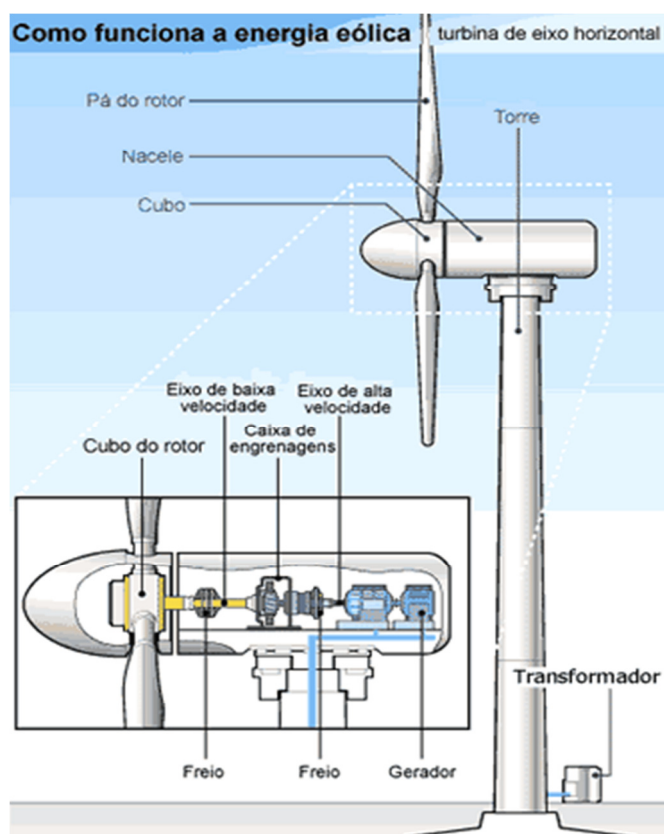


Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal
 Fonte: Como tudo funciona – TEEH, 2016

2.3.2 Turbina eólica de eixo vertical (TEEV)

O rotor da TEEV roda em torno de um eixo vertical (Figura 4), a principal vantagem disso é que ela pode receber vento de qualquer direção, por isso quando o vento muda, a turbina eólica não tem nenhuma necessidade de iniciar o dispositivo de direção para desviar o rotor para enfrentar o vento, porque não há necessidade do dispositivo de orientação, a estrutura da turbina é simplificada. Outro mérito deste tipo é que a caixa de engrenagem e o gerador podem ser instalados no chão, facilitando a instalação e manutenções futuras. Devido à razão do fluxo de vento do eixo vertical ser mais complexo que o eixo horizontal, essas turbinas eólicas começaram tarde, e a sua tecnologia ainda está em constante desenvolvimento.

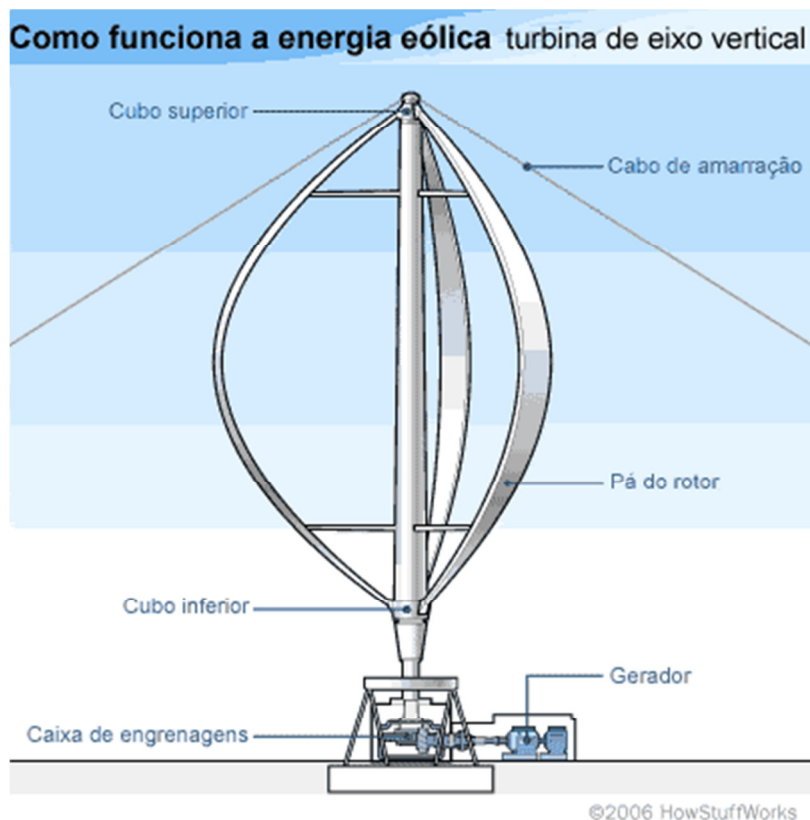


Figura 4 - Componentes de uma turbina eólica de eixo vertical
Fonte: Como tudo funciona – TEEV, 2016

2.4 LIMITE DE BETZ

Não há nenhuma maneira de aproveitar toda a energia do vento, porque o método utilizado para o aproveitamento dessa energia é retardando a direção do vento e removendo parte de sua energia cinética. O limite teórico de energia que pode ser removido é chamado de limite de Betz (Figura 5), em referência a uma formulação de 1919, feita pelo físico Albert Betz, onde diz ser possível converter apenas $16/27$ da energia cinética, ou seja, ao utilizar um gerador eólico somente cerca de 59% da energia disponível irá se transformar em energia mecânica.

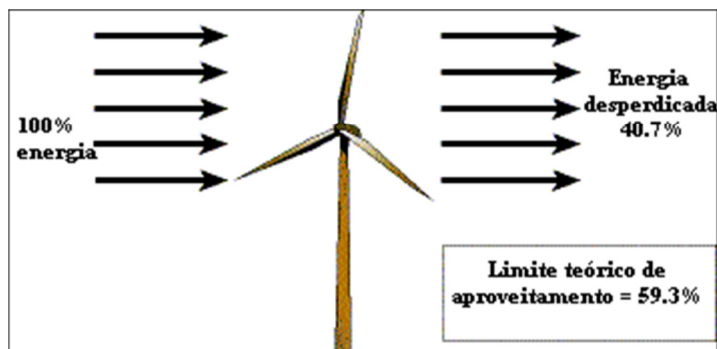


Figura 5– Limite de Betz
 Fonte: Eficiência dos aerogeradores, 2016

2.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A potência de saída e a eficácia de custo de uma turbina eólica são fortemente influenciadas pela velocidade média do vento a qual é submetida. A obtenção de uma boa estimativa desta velocidade é, portanto, de grande importância em planejamento. No caso de grandes instalações, uma boa dose de esforço de especialistas é dedicada a este aspecto do planejamento, mas quando se trata de turbinas menores, muitas vezes há uma ausência de compreensão básica da aerodinâmica natural do vento. A melhor localização para a energia eólica seria em algum lugar onde o vento sempre soprou na mesma velocidade, a partir da mesma direção, em uma velocidade alta o suficiente para a turbina produzir sua potência ideal, mas não tão elevado que exija que a turbina se desligue devido ao excesso de velocidade, vento constante em uma boa velocidade é melhor que vento forte.

Para calcular a provável potência de uma turbina eólica é necessário compreender o vento no local planejado, o modelo de distribuição de Weibull representa de forma gráfica como muitas vezes o vento sopra a uma determinada velocidade (Gráfico 1).

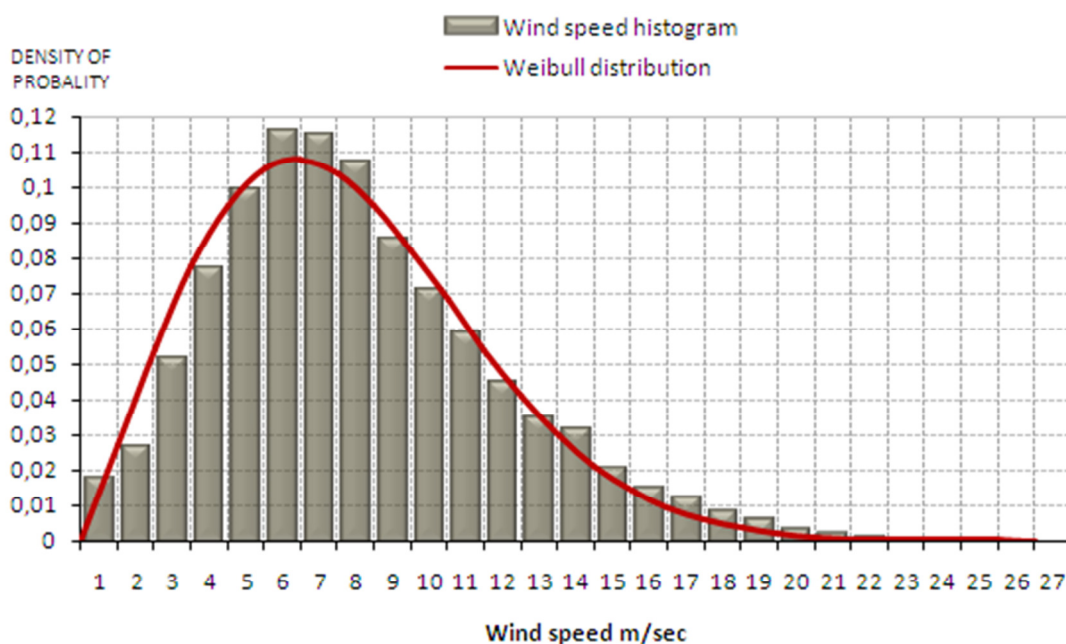


Gráfico 1- Distribuição de Weibull
 Fonte: Green – Power, Weibull distribution, 2016

Esta ferramenta estatística demonstra quantas vezes os ventos de velocidades diferentes serão vistos em um local com certa velocidade média, isto ajuda a escolher uma turbina eólica com a velocidade do vento em que a turbina comece a gerar energia, e a velocidade na qual a turbina atinge o seu limite com um aumento na intensidade do vento. Uma vez que a distribuição de Weibull pode ser usada para calcular a probabilidade de uma velocidade do vento em particular, pode ser utilizada para calcular o número de horas por ano onde determinadas velocidades são frequentes, portanto, a probabilidade de potência total de uma turbina eólica por ano.

2.6 TIPOS DE SISTEMAS EÓLICOS

Para a utilização de um sistema eólico é possível aplicá-lo de três modos distintos: isolado da rede elétrica, interligado, ou em um sistema híbrido.

2.6.1 - Sistemas isolados

Normalmente os sistemas isolados (Figura 6) utilizam baterias para armazenamento de energia elétrica para posterior utilização. Estes necessitam de um dispositivo controlador para controlar a carga que é usada em sistemas de pequeno porte, nos quais, os aparelhos utilizados são os de baixa tensão e corrente contínua. O controlador de carga tem como principal objetivo não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga. Para utilizar essa energia em equipamentos que operam com corrente alternada é necessário a utilização de um inversor.

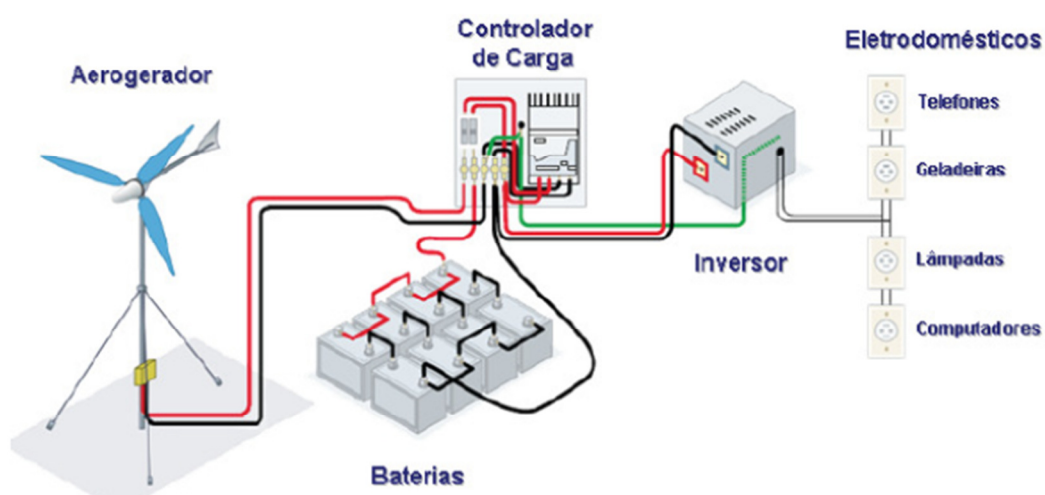


Figura 6- Configuração de um sistema isolado
 Fonte: Portal energia - Sistema Isolado, 2016

2.6.2 - Sistemas interligados à rede

Nos sistemas interligados à rede elétrica (Figura 7), a corrente contínua produzida pelo gerador da turbina é encaminhada por intermédio de cabos elétricos para uma caixa de interligação e posteriormente para o inversor. O inversor converte a corrente contínua em corrente alternada. Essa corrente é então injetada na rede elétrica, sendo contabilizada num sistema de contagem autônomo.

Sistemas conectados à rede podem ser utilizados tanto para abastecer uma casa, por exemplo, injetando ou demandando um saldo de energia na rede, ou então

podem simplesmente produzir e injetar a energia na rede elétrica, como é o caso de uma usina hidroelétrica ou térmica.

Um sistema conectado à rede pode trabalhar em três condições:

- Na primeira condição o sistema simplesmente abastece a rede. É o caso das plantas eólicas e que funcionam como uma usina de energia qualquer.*
- Na segunda, o sistema tanto abastece quanto recebe energia da rede, dependendo da necessidade. Este é o caso de uma casa com sistema conectado à rede, quando consome mais do que gera, como nos períodos com pouco vento, ela consome energia da rede. Quando gera mais que consome, ela abastece a rede elétrica.*
- Na terceira condição o sistema é abastecido pela rede quando a geração for abaixo da demanda. A energia é produzida para alguma finalidade específica naquele local e nunca é injetada para a rede da concessionária.*

Quando a demanda local estiver acima da capacidade de geração do sistema local, a energia da rede da concessionária é utilizada para complementar a necessidade de energia.

Esta solução pode ser utilizada quando não é possível abastecer a rede, devido a uma questão técnica ou de regulação.

Comparada com um sistema isolado, tem a vantagem de não requerer baterias visto que a rede da concessionária é utilizada nos momentos em que não há geração local ou a geração é insuficiente, atuando como se fosse uma “bateria”. Do ponto de vista dos componentes, um sistema aerogerador conectado à rede é similar ao sistema isolado com a diferença que o sistema conectado não necessita de baterias para armazenamento de energia.

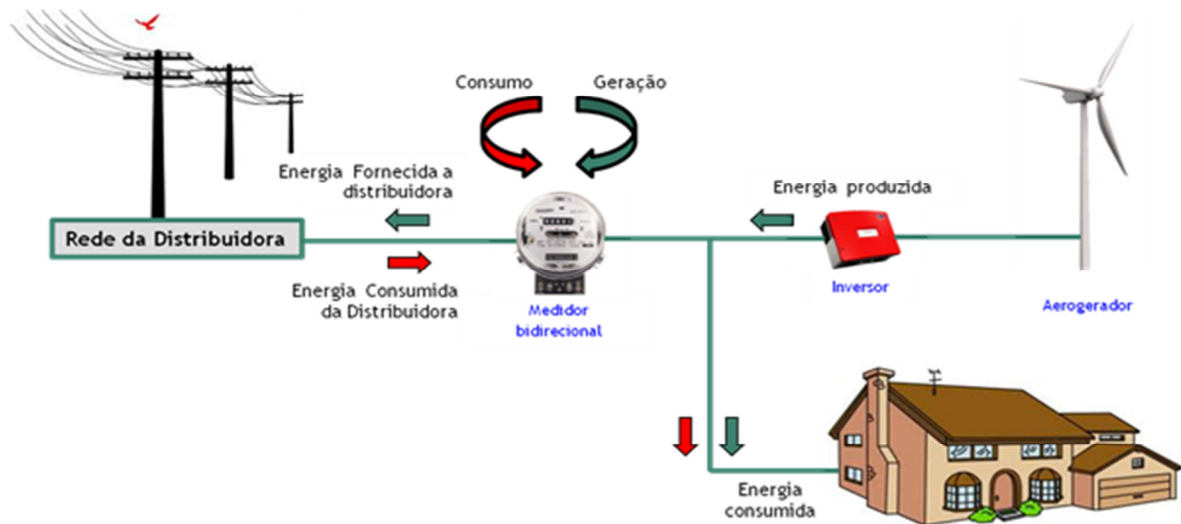


Figura 7- Configuração de um sistema interligado à rede
 Fonte: Ecotecnologia Viridian -Sistema Interligado, 2016

2.6.3 - Sistemas híbridos

Quando dois ou mais sistemas de geração de energia são combinados numa única instalação para a geração de energia elétrica, surge o que é chamado de sistema híbrido (Figura 8). Estes sistemas são geralmente compostos por fontes de energias renováveis, grupos geradores, ou baterias.

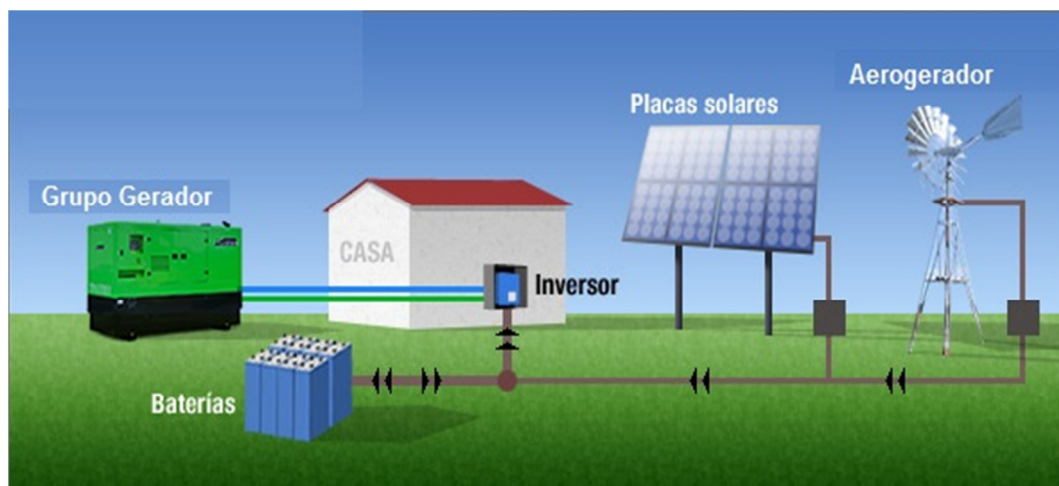


Figura 8 - Configuração de um sistema híbrido
 Fonte: Inmesol -Sistema Híbrido, 2016

2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS

De acordo com uma pesquisa realizada pelo Centro de Energia Eólica da PUC-RS, os aerogeradores de pequeno porte têm impacto ambiental geralmente desprezível, já os impactos ambientais de parques eólicos estão relacionados principalmente a ruídos, ao impacto visual e ao impacto sobre a fauna.

2.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Vantagens:

- *É inesgotável;*
- *Transformação limpa do recurso energético natural (o vento);*
- *Não emite gases poluentes nem gera resíduos;*
- *Diminui a emissão de gases de efeito estufa*
- *São compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado;*
- *Não necessitam de abastecimento de combustível e requerem pouca manutenção.*

Desvantagens:

- *Custo alto de investimento;*
- *Impacto sonoro: o som do vento bate nas pás produzindo um ruído constante;*
- *Impacto visual: a instalação dos parques eólicos gera uma grande modificação da paisagem;*
- *Impacto sobre a fauna: em fazendas eólicas ocorre mortalidade de aves por impacto com as pás das turbinas, por isso não é recomendável a sua instalação em áreas de migração de aves, áreas de reprodução e áreas de proteção ambiental.*

3 DESENVOLVIMENTO

Para realização deste projeto foi analisada a velocidade média de ventos em Araucária-PR, verificada a incidência e probabilidade de se ter um maior sucesso na aplicação. Para início de trabalho foi estudada a região através do atlas do potencial eólico brasileiro, disponível no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESEB), onde constam as velocidades dos ventos em cada mês do ano, sua sazonalidade.

Para acrescentar dados mais consistentes, foram utilizadas velocidades dos ventos na região estudada, com dados fornecidos pela divisão de monitoramento da qualidade do ar do Instituto Lactec. Suas estações de monitoramento estão a uma altura próxima dos 10 metros com valores mais próximos aos que poderão ser encontrados para a instalação de microgeração eólica em residências e as disponíveis no atlas do potencial energético estão instaladas em torres com aproximadamente 50 metros de altura, e com o auxílio de cálculos será possível obter seu valor para 10 metros de altura também, fazendo um comparativo com a estação automática.

Foi feita uma pesquisa de mercado dentre as empresas fabricantes de microgeradores eólicos, qual potência poderá gerar conforme a velocidade do vento, e qual a demanda que conseguirá suprir. Por ser uma modalidade ainda nova de microgeração no Brasil, não existem ainda no mercado muitas opções de aerogeradores voltados ao uso residencial, sendo na sua grande maioria produtos importados e sem certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), ou sem homologação pela distribuidora local.

3.1 ESTUDO DO LOCAL A SER INSTALADO O MICROGERADOR

Utilizando-se de dados de anemômetros instalados a uma altura próxima aos 10 metros e situados em ambiente urbano, tem-se uma análise mais confiável sobre o sucesso ou não do projeto. Um anemômetro encontra-se instalado no bairro Fazenda Velha em Araucária(Figura 9), primeiramente foram analisados dados do ano de 2013, 2014 e 2015, com valores atualizados de hora em hora pela estação automática, porém em alguns meses não foram possíveis as coletas de dados.

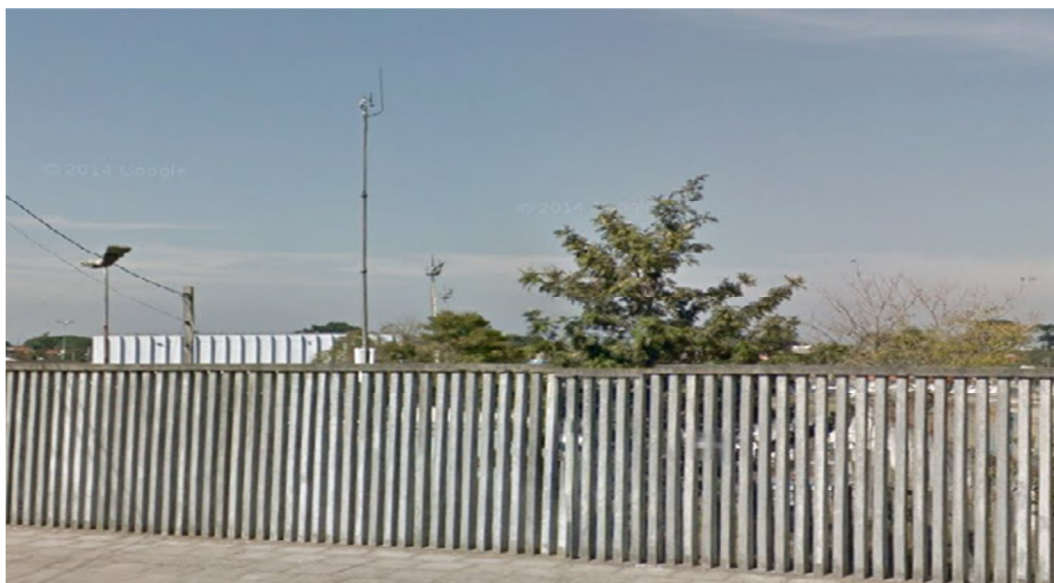


Figura 9 - Estação Automática Assis Araucária
Fonte: O Autor, 2016

Por situar-se em uma região mais aberta, longe de edifícios e árvores de grande altura, conseguiu-se obter velocidades esporádicas superiores a 5 m/s em alguns meses de 2013, 2014 e 2015, mas quando se colocam esses valores pela média (Gráficos 2, 3 e 4), a velocidade cai, e muito.

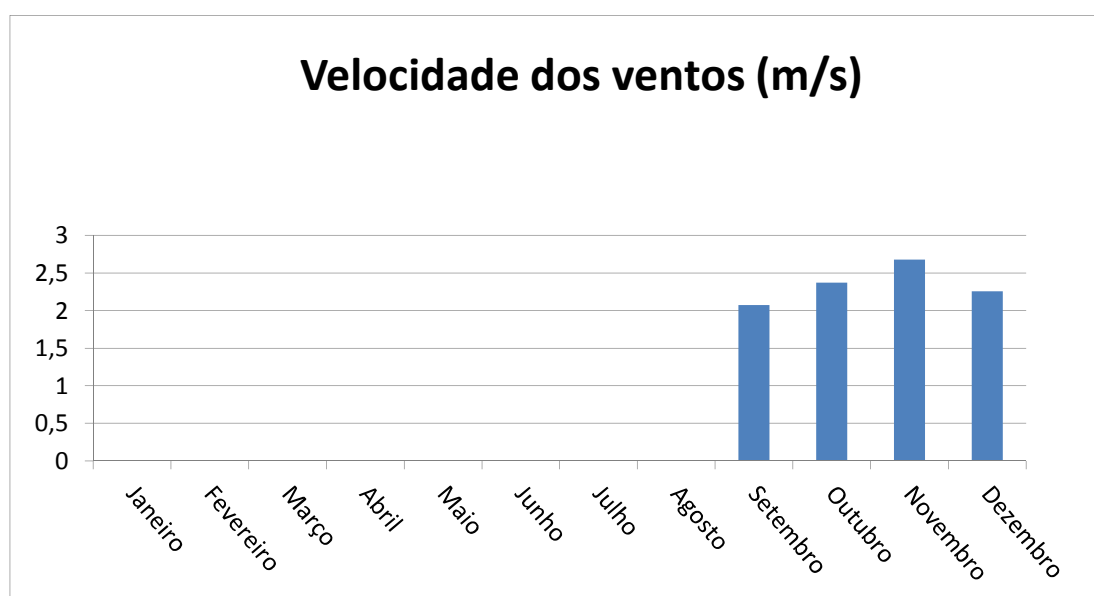


Gráfico 2- Velocidade média dos ventos (2013)
Fonte: O Autor, 2016

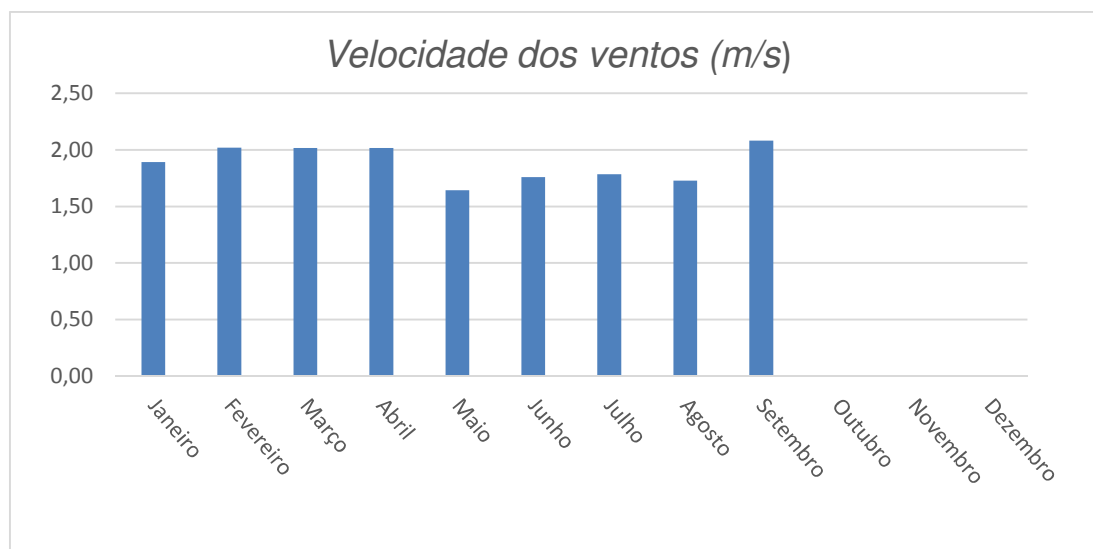


Gráfico 3- Velocidade média dos ventos (2014)
Fonte: O Autor, 2016

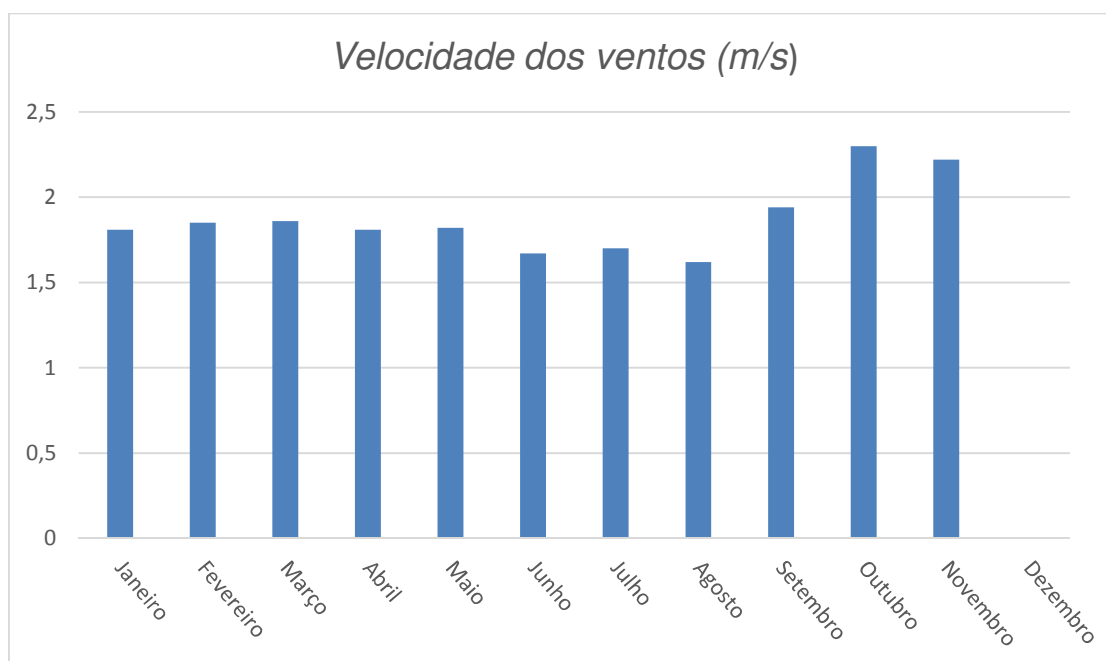


Gráfico 4- Velocidade média dos ventos (2015)
Fonte: O Autor, 2016

Esses dados de velocidade média são apenas para comparação com dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, onde as medições estão à uma altura de 50 metros, mas que por meio de cálculos serão extrapolados para a altura do estudo em questão, 10 metros.

De posse das coordenadas do local (Figura 10), pode-se encontrar a média da velocidade dos ventos na região e sua sazonalidade.

Figura 10 - Coordenada Geográfica
Fonte: Cresesb - Cepel, 2016

Velocidade média de vento a 50 metros de altura, os valores referem-se à média de ventos por trimestre, começando no último trimestre de 2015 e terminando no terceiro trimestre de 2016 (Tabela 1 e Gráfico 5).

Tabela 1- Dados de ventos 50 m

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de ventos à 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
Velocidade média do vento	m/s	4,09	4,8	5,24	4,93	4,77
Fator C		4,62	5,42	5,91	5,55	5,38
Fator K		2,2	2,24	2,51	2,54	2,35
Densidade de potência	W/m ²	73	117	139	114	111

Fonte: Cresesb - Cepel, 2016

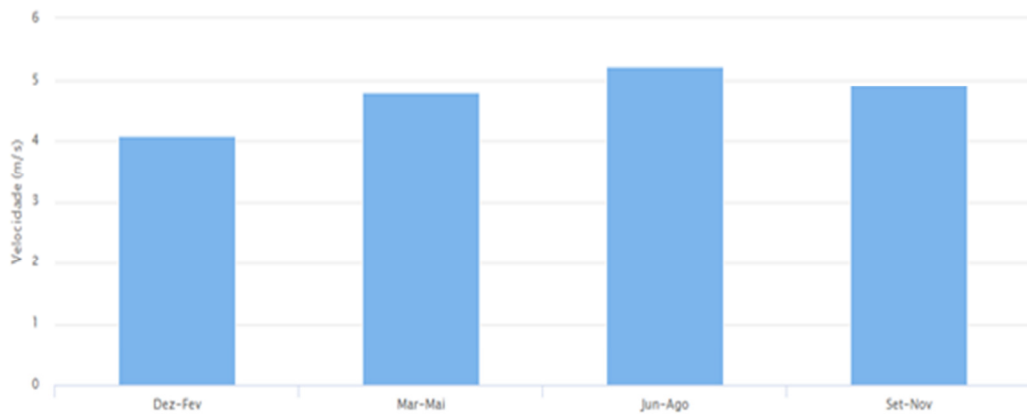


Gráfico 5- Velocidade Média Sazonal dos ventos a 50 m de altura
Fonte: Cresesb - Cepel, 2016

Considerando os dados do CRESESB para ventos na altura de 50 metros onde foram realizadas as medições, para as mesmas coordenadas onde está instalada a estação automática do Lactec em Araucária - PR, foi realizado o cálculo para extrapolar esses valores para uma altura de 10 metros, que seria a altura da torre do aerogerador residencial. Considerando a rugosidade $Z_o = 1,0$, ambiente de florestas baixas, área urbana com edificações baixas.

$$V = V_{ref} \left(\frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_o}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_o}\right)} \right) \quad (6)$$

V = Velocidade do vento a determinar (m/s)

V_{ref} = Velocidade do vento medida (m/s)

Z_o = Altura a determinar (m)

Z_{ref} = Altura da medição do vento (m)

Z = comprimento de rugosidade (m)

Determinando a velocidade do vento para uma altura de 10 metros:

$$V = 4,77 \left(\frac{\ln\left(\frac{10}{1,0}\right)}{\ln\left(\frac{50}{1,0}\right)} \right)$$

$V = ?$

$V_{ref} = 4,77 \text{ m/s}$

$$Z = 10 \text{ m}$$

$$Z_0 = 1,0$$

$$Z_{\text{ref}} = 50 \text{ m}$$

$$V = 2,81 \text{ m/s}$$

Para essa extrapolação da velocidade do vento, apesar de ser em períodos diferentes, nota-se um valor muito aproximado aos medidos pela estação automática, porém para esses valores a potência disponível no vento ainda é bem inferior à necessária para tocar um microgerador eólico, que neste projeto terá um rotor de 3,4m que necessitará de uma velocidade inicial de 3 m/s para poder gerar.

Potência disponível no vento:

$$P = ?$$

$$\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$$

$$A = \frac{(\pi \times D^2)}{4}$$

$$V = 2,81 \text{ m/s}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{2} 1,225 \cdot \frac{\pi \times D^2}{4} \cdot v^3$$

$$P = \frac{1}{2} 1,225 \cdot \frac{\pi \times 3,4^2}{4} \cdot 2,81^3$$

$$P = 123,4 \text{ W}$$

Mas há um problema ao examinar a média de velocidade para determinar um aerogerador, esses números não refletem a real potência do vento. Esses valores podem induzir ao erro, tanto para uma velocidade maior quanto menor, no caso de uma velocidade maior, esse valor poderá ser tão elevado que o aerogerador entre em modo de proteção, onde ele é programado para frear em altas velocidades de vento, ou inclinar o sentido das pás para evitar possíveis danos à turbina, e no caso de menor velocidade quando a mesma não é suficiente para iniciar a geração e consequentemente conectar ao sistema elétrico.

3.2 VIABILIDADE TÉCNICA

A viabilidade de um projeto para um sistema de microgeração eólica depende de alguns fatores como incidência de velocidade dos ventos na região, tipo de topografia, altitude, condições climáticas, custos de mão de obra e material.

Há no mercado poucas opções de aerogeradores de pequeno porte para utilização em residências, mas cabe ao microprodutor escolher o modelo que mais se adapte à sua necessidade e ao seu local, visto que o tamanho de diâmetro do rotor também varia, podendo depender de um espaço maior para sua instalação.

Neste estudo de viabilidade não será levado em consideração o custo do aerogerador bem como sua instalação e demais despesas, cabendo essa informação a outro projeto de viabilidade econômica, ficando este, portanto, restrito à parte técnica.

Uma vez que a velocidade média do vento não parece ser tão útil quanto se espera, a solução é utilizar um gráfico de distribuição de Weibull. O modelo de distribuição de Weibull dá uma representação gráfica de como muitas vezes o vento sopra a uma determinada velocidade, utilizada para calcular o número de horas por ano que determinadas velocidades do vento são suscetíveis de geração e, portanto, a probabilidade de potência total de uma turbina eólica por ano.

A função de Weibull leva em consideração o desvio padrão dos dados analisados, sendo um importante parâmetro de estatística, introduzindo informações sobre incertezas com que podem ocorrer as velocidades previstas a partir dos dados coletados.

O histograma representa em forma de gráfico a frequência de cada velocidade com base nos dados coletados, é construído a partir da base de dados correspondente às distribuições das frequências da velocidade do vento durante um tempo mínimo, resultante das medições do local.

Analizando por meio da distribuição de Weibull e histograma nas tabelas e gráficos a seguir, nota-se mais claramente a ocorrência de ventos por velocidade, onde o Bloco representa a velocidade do vento (m/s), a Frequência representa a quantidade de horas que essa velocidade foi registrada no período, e Weibull o percentual de cada velocidade baseada na sua totalidade.

Tabela 2- Distribuição de Weibull 2013

<i>Bloco(m/s)</i>	<i>Frequência (horas)</i>	<i>Weibull (%)</i>
1	692,638765	0,236557
2	990,439818	0,338265
3	735,116829	0,251064
4	336,881931	0,115055
5	99,8798492	0,034112
6	19,4686433	0,006649
7	2,50819383	0,000857
8	0,2137451	7,3E-05
9	0,01203276	4,11E-06
10	0,00044642	1,52E-07
11	1,0884E-05	3,72E-09
12	1,7383E-07	5,94E-11
13	1,8131E-09	6,19E-13
14	1,2309E-11	4,2E-15
15	5,4226E-14	1,85E-17

Fonte: O autor, 2016

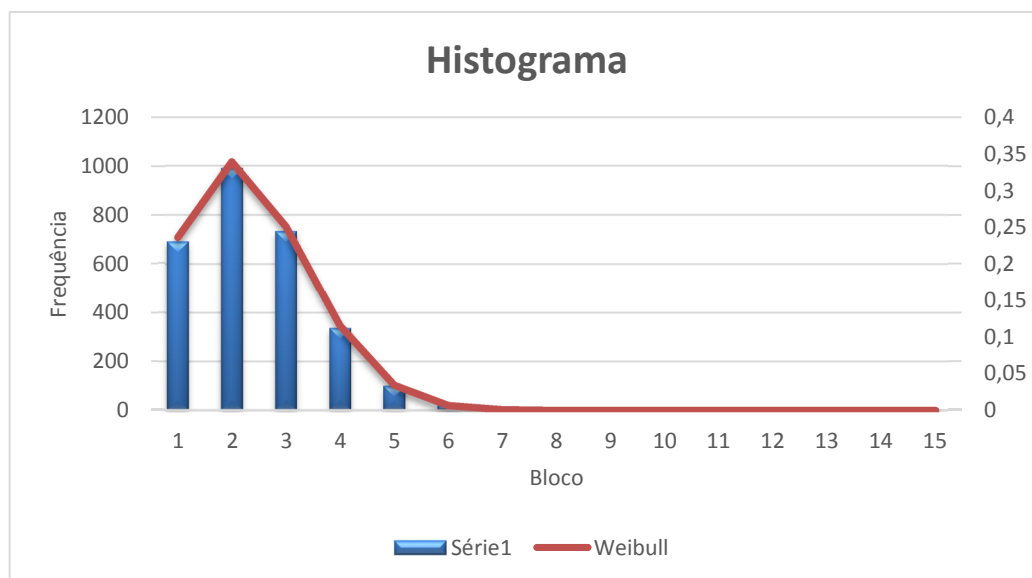


Gráfico 6 - Histograma 2013
Fonte: O autor, 2016

Tabela 3 - Distribuição de Weibull 2014

Bloco (m/s)	Frequência (horas)	Weibull (%)
1	2367,08392	0,361277
2	2074,18512	0,316573
3	1103,90616	0,168484
4	416,670612	0,063594
5	118,261144	0,01805
6	26,0453654	0,003975
7	4,54144991	0,000693
8	0,63597242	9,71E-05
9	0,07230629	1,1E-05
10	0,00673229	1,03E-06
11	0,000517	7,89E-08
12	3,2944E-05	5,03E-09
13	1,751E-06	2,67E-10
14	7,798E-08	1,19E-11
15	2,9217E-09	4,46E-13

Fonte: O autor, 2016

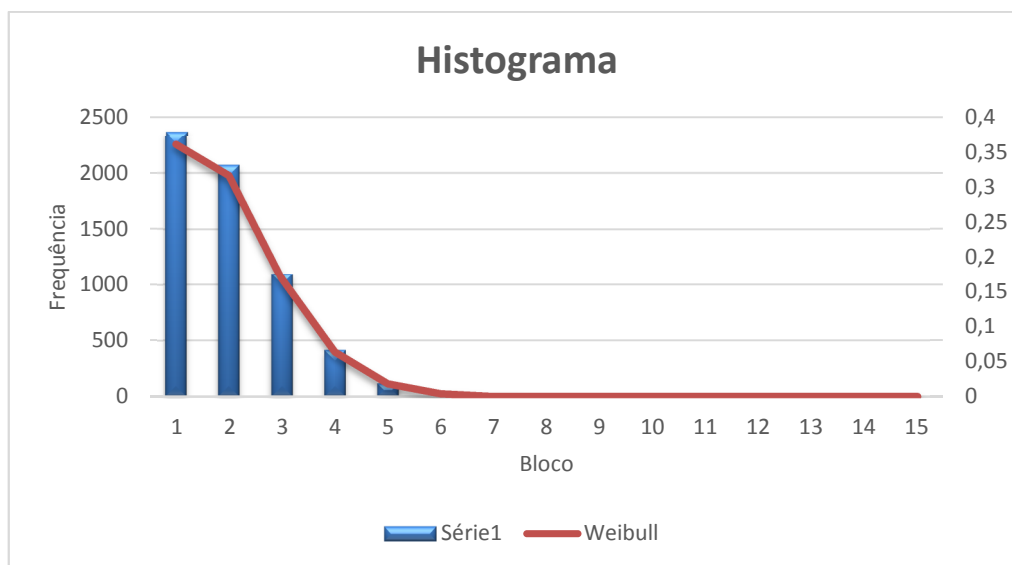


Gráfico 7 - Histograma 2014

Fonte: O autor, 2016

Tabela 4 Distribuição de Weibull 2015

Bloco (m/s)	Frequência (Horas)	Weibull (%)
1	2799,52667	0,349242
2	3003,97863	0,374748
3	1483,55568	0,185074
4	399,002652	0,049776
5	61,330189	0,007651
6	5,489979	0,000685
7	0,28856059	3,6E-05
8	0,00893791	1,12E-06
9	0,00016336	2,04E-08
10	1,762E-06	2,2E-10
11	1,121E-08	1,4E-12
12	4,2027E-11	5,24E-15
13	9,2743E-14	1,16E-17
14	1,2031E-16	1,5E-20
15	9,1634E-20	1,14E-23

Fonte: O autor, 2016

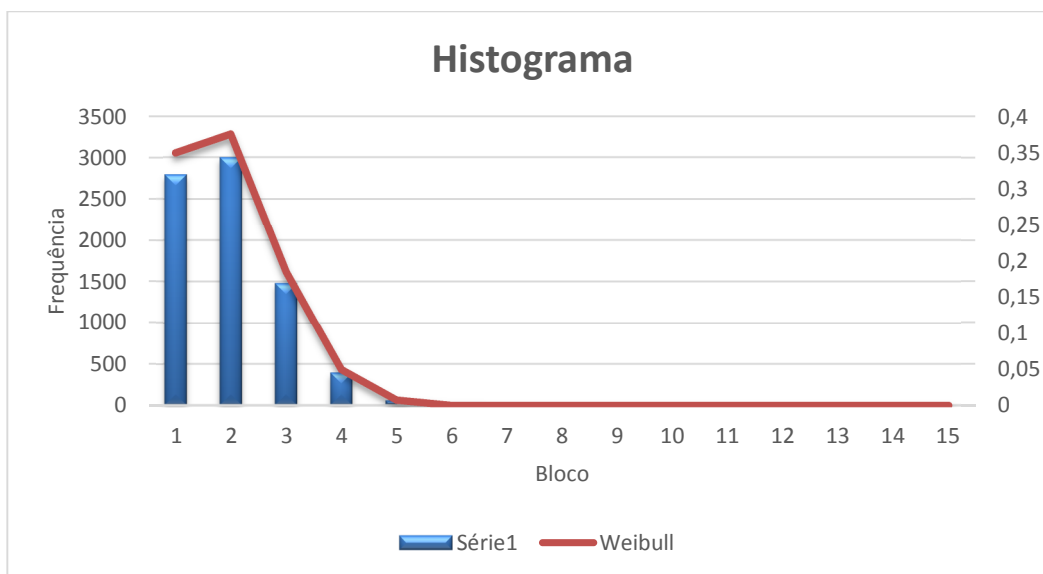


Gráfico 8 - Histograma 2015
 Fonte: O autor, 2016

De posse dos dados da distribuição de Weibull, foram selecionados microgeradores eólicos que atendessem à legislação vigente e também às características de ventos da região, e embora buscava-se um aerogerador de dimensões menores para atendimento à residências, o modelo no qual se adequou ao projeto foi um aerogerador de produção nacional, porém tem seu diâmetro do rotor de 3,4 metros, e só começa a gerar energia com ventos a partir de 3 m/s, mas já está homologado na Companhia Paranaense de Energia (COPEL), e em processo de certificação no INMETRO.

Tabela 5 Descrição técnica aerogerador

Potência Nominal (12,5 m/s)	3kW
Velocidade inicial para geração	3 m/s
Número de pás	3
Diâmetro do rotor	3,4 m
Material das pás	Fibra de vidro com epoxy
Velocidade máxima de sobrevivência	55 m/s
Gerador	Ímãs permanentes
Sistema de conexão à rede	220 v (mon.) 60 HZ
Deslocamento vertical (proteção)	A partir de 15 m/s
Peso aproximado do equipamento	650 Kg
Acoplamento gerador – rotor elétrico	Direto
Altura padrão da torre	10 m
Ângulo de giro do gerador ao eixo da torre	360°
Vida útil estimada	20 anos
Eletrônica de potência	Componentes: - Inversor com conexão à rede, sistema monofásico; - Retificador; - Carga resistiva; - Monitoramento via internet;
Grau de proteção	IP 67

Fonte: O autor¹, 2016

A partir do cálculo da distribuição de Weibull, tem-se condições de proceder o confronto dos dados da velocidade do vento com a curva de potência (Gráfico 9) do aerogerador. Desta forma, é possível conseguir um prognóstico da energia gerada.

¹Descrição técnica adaptada conforme modelos disponíveis no mercado brasileiro, preservando os fabricantes.

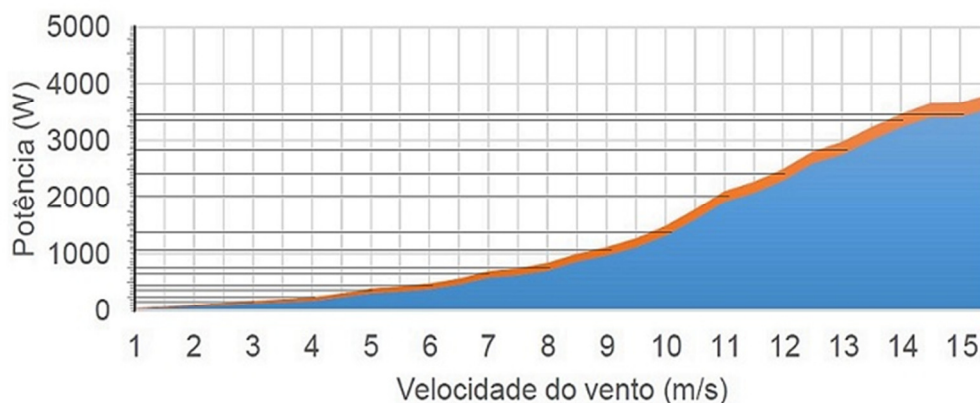


Gráfico 9 - Curva de potência
 Fonte: O autor², 2016

Para calcular a potência gerada por um microgerador eólico adiferentes velocidades, foi multiplicado o número de horas em cada velocidade do vento pela energia gerada na mesma velocidade mostrada em sua curva de potência, para obter o número de Watt horas de energia gerados.

No ano de 2013, foram analisados quatro meses, setembro, outubro, novembro e dezembro, e de acordo com a distribuição de Weibull, foram considerados valores acima dos 3 m/s, velocidade inicial de geração, obtendo uma média de 60,92 kWh/mês(Tabela 6).

²Curva de potência adaptada conforme médias para a mesma potência do aerogerador em estudo.

Tabela 6 Energia gerada em 2013

Velocidade (m/s)	Horas	Curva aerogerador (W)	Energia (W.h)
3	735,1168	155	113943,11
4	336,8819	250	84220,48
5	99,87985	350	34957,95
6	19,46864	450	8760,89
7	2,508194	650	1630,33
8	0,213745	750	160,31
9	0,012033	1050	12,63
10	0,000446	1400	0,62
11	1,09E-05	2000	0,02
12	1,74E-07	2450	0,00
13	1,81E-09	2850	0,00
14	1,23E-11	3350	0,00
15	5,42E-14	3450	0,00
		TOTAL NO PERÍODO	243,69
Horas	Período (Dias)	Meses	Média kwh/mês
2928	122	4	60,92

Fonte: O autor, 2016

Para o ano de 2014 (tabela 7), foram coletadas amostras de janeiro a setembro, totalizando nove meses, obtendo uma média mensal de 36,88 kWh/mês.

Tabela 7 Energia gerada em 2014

Velocidade (m/s)	Horas	Curva aerogerador (W)	Energia (W.h)
3	1103,906	155	171105,45
4	416,6706	250	104167,65
5	118,2611	350	41391,40
6	26,04537	450	11720,41
7	4,54145	650	2951,94
8	0,635972	750	476,98
9	0,072306	1050	75,92
10	0,006732	1400	9,43
11	0,000517	2000	1,03
12	3,29E-05	2450	0,08
13	1,75E-06	2850	0,00
14	7,8E-08	3350	0,00
15	2,92E-09	3450	0,00
		TOTAL	331,90

Horas	Período (Dias)	Meses	Média kwh/mês
6552	273	9	36,88

Fonte: O autor, 2016

Já em 2015 (Tabela 8), foram analisados dados de janeiro a novembro, e nesses onze meses a média gerada foi de 32,17 kWh/mês.

Tabela 8 Energia gerada em 2015

Velocidade (m/s)	Horas	Curva aerogerador (W)	Energia (W.h)
3	1483,555677	155	229951,13
4	399,0026522	250	99750,66
5	61,33018899	350	21465,57
6	5,489979003	450	2470,49
7	0,288560589	650	187,56
8	0,008937914	750	6,70
9	0,000163359	1050	0,17
10	1,76203E-06	1400	0,00
11	1,12101E-08	2000	0,00
12	4,20272E-11	2450	0,00
13	9,2743E-14	2850	0,00
14	1,20314E-16	3350	0,00
15	9,16343E-20	3450	0,00
		TOTAL	353,83

Horas	Período (Dias)	Meses	Média (kwh/mês)
8016	334	11	32,17

Fonte: O autor, 2016

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ambiente urbano não só influencia na velocidade média do vento, mas também afeta a variabilidade ou desvio padrão, interferindo, portanto, na potência do microgerador eólico. A distribuição de Weibull possibilitou mostrar que não basta olhar apenas a média para verificar se um projeto de microgeração eólica é viável ou não, tem-se que analisar a frequência, quantas vezes que um determinado valor apareceu na amostragem, e compará-lo com a curva de potência para o modelo de aerogerador escolhido.

Verificou-se que para uso residencial o resultado da energia gerada no tempo não foi um valor satisfatório em relação à potência instalada, pode-se dizer que do ponto de vista técnico o projeto para esse microgerador eólico se torna inviável, mas a região estudada tem um bom potencial de ventos constantes, o que poderia se tornar viável caso venha a ser disponibilizado no mercado brasileiro aerogeradores residenciais mais modernos, com tecnologia que possa aproveitar melhor os ventos iniciais e, com tamanhos reduzidos para ambientes urbanos.

Foram levantados dados de intensidade dos ventos por meio de anemômetros das estações automáticas do local estudado, e na sequência comparados com os dados do Atlas Eólico para as mesmas coordenadas, como os dados do Atlas Eólico eram para uma altura de 50m foi necessário fazer a transposição desses valores para a altura de um aerogerador para uso residencial, foi utilizado a altura de 10m para comparação.

É importante salientar que os cálculos em que o banco de dados é construído faz uso da topografia geográfica da área, mas não a topografia detalhada, é difícil obter estimativas confiáveis da velocidade dos ventos em áreas urbanas porque existe essa variabilidade na velocidade do vento, dependendo do local. Mesmo assim em comparação dos dados das medições locais com os dados do CRESESB, não houve uma diferença em relação à média de velocidade dos ventos significativa que tornasse viável o microgerador eólico.

Como trabalho futuro sugere-se o estudo de viabilidade de microgeradores eólicos no sistema isolado para a região em questão, possibilitando a utilização de uma gama maior de equipamentos, podendo assim tornar o estudo viável.

REFERÊNCIAS

ABEEOLICA - **Brasil um potencial gigante de produção de energia eólica** - Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/artigos/2478-brasil-um-potencial-gigante-de-produ%C3%A7%C3%A3o-de-energia-e-%C3%B3lica.html>> Acesso em 24 de outubro de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3 ed. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf> > Acesso em 15 de maio de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída. 2016**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 24 de outubro de 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO - CRESESB. **História da Energia Eólica e suas utilizações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=211> Acesso em 24 de outubro de 2016

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO – CRESESB – CEPEL – **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf> Acesso em 15 de maio de 2016.

CENTRO DE ENERGIA EÓLICA PUCRS - - **Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica** – Disponível em:<<http://www.pucrs.br/ce-eolica/index.htm>>Acesso em 24 de outubro de 2016

COMO TUDO FUNCIONA – TEEH - **Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal** – Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>> Acesso em: 15 de abril de 2016.

COMO TUDO FUNCIONA – TEEV - **Componentes de uma turbina eólica de eixo vertical** – Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>> Acesso em 15 de abril de 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL - **Micro e Minigeração – Sistema de Compensação de Energia Elétrica** - Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656?OpenDocument&secao=Distribuicao>> Acesso em 15 de maio de 2016.

CUSTÓDIO, R.S **“Energia eólica para produção de energia elétrica, Eletrobrás”**. Rio de Janeiro, 2009.

DORADO, Rodrigo Martins. **Avaliação de modelos meteorológicos de meso escala em projetos de energia eólica.** 2013.

ECOTECNOLOGIA VIRIDIAN -**Sistema Interligado** – Disponível em:<http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+eolica/6> Acesso em 15 de abril de 2016.

EFICIÊNCIA DOS AEROGERADORES, **Limite de Betz** Disponível em:<<http://www.aerogeradores.org/limitedebetz.php>>Acesso em 24 de setembro de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf> Acesso em 27 de abril de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA–EPE. **Consumo de Energia no Brasil.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>> Acesso em 24 de setembro de 2016.

GREEN – POWER, **Weibull distribution**, - Disponível em: <<http://green-power.com.pl/en/home/wiatr-i-jego-pomiar-w-energetyce-wiatrowej/>>Acesso em 17 de agosto de 2016.

INMESOL -**SISTEMA HÍBRIDO** - -Disponível em: <<http://inmesol.su/gibridnye-sistemy>> Acesso em 15 de maio de 2016.

LUDWIG, Daniel Evandro. **Análise numérica da influência de fatores atmosféricos na esteira aerodinâmica de turbinas eólicas.** 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS & ENERGIA –Brasil. **Plano Decenal de Energia Elétrica 2006-2015.** RJ: MME, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS & ENERGIA E EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA–Brasil. **Matriz Energética Nacional 2030.** Brasília: MME: EPE, 2007.

PETRY, A. P.; MATTUELLA, J. M. L. **Análise do Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia empregando o Software Livre Alwin.** Porto Alegre, 2007.

PORTAL ENERGIA – **Sistema Isolado** – Disponível em: <http://www.portal-energia.com/componentes-e-aplicacoes-de-um-sistema-micro-eolico/> Acesso em 15 de maio de 2016.

SILVA, N. F. **Fontes de Energia Renováveis complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica,** 263p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.