



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS-RN
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ROSÂNGELA PAULO DE SOUSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TURBINAS EÓLICAS PARA
APLICAÇÃO RESIDENCIAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

PAU DOS FERROS-RN

2017

ROSÂNGELA PAULO DE SOUSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGETICA DE TURBINAS EÓLICAS PARA
APLICAÇÃO RESIDENCIAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros,
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Ernano Arrais Junior, Prof. Dr.

Co-orientador: Mônica Paula de Sousa, Prof.
Me.

PAU DOS FERROS-RN

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.

S
719a SOUSA, ROSÂNGELA.
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGETICA DE TURBINAS
EÓLICAS PARA APLICAÇÃO RESIDENCIAL NO SEMIÁRIDO
POTIGUAR / ROSÂNGELA SOUSA. - 2017.
71 f. : il.

Orientador: ERNANO ARRAIS.
Coorientadora: MÔNICA SOUSA.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2017.

1. Energia Eólica. 2. Semiárido Potiguar. 3.
Turbinas para Aplicação Residencial. I. ARRAIS,
ERNANO, orient. II. SOUSA, MÔNICA, co-orient. III.
Título.

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

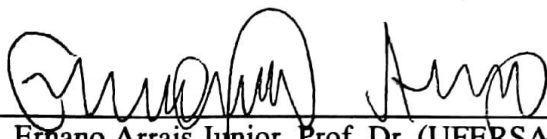
ROSÂNGELA PAULO DE SOUSA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGETICA DE TURBINAS EÓLICAS PARA
APLICAÇÃO RESIDENCIAL NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

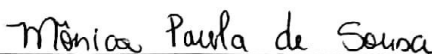
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, Centro
Multidisciplinar de Pau dos Ferros,
como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 10/10/2017

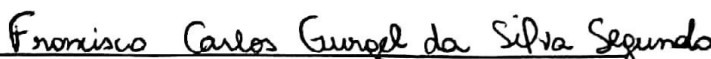
BANCA EXAMINADORA



Ernano Arrais Junior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Mônica Paula de Sousa, Prof. Ma. (UFERSA)
Membro Examinador



Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Em memória de Tereza Maria de Jesus (“Madinha”)

Aos meus pais e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida, pelas oportunidades e por permitir alcançar tal objetivo. Sem ti não sabereis chegar ao fim, o caminho será guiado da maneira que escreveste.

Agradeço a minha família, o qual honro e dedico essa conquista, pois sem o apoio e a compreensão destes não seria possível tal realização.

A minha coorientadora e irmã, Mônica Sousa, por toda paciência e amor dedicado, por acreditar que sou capaz e incentivar a seguir meus sonhos, cujo o principal objetivo é orgulhar-te.

Aos meus amigos, não só os que ganhei nesses três anos, mas todos que fazem parte da minha história e em especial a José Urbano Junior que me deu total apoio nas horas de maior necessidade e angustia desde o dia que o conheci e que levarei para sempre comigo.

Aos meus professores, os qual foram à base da minha formação, que diante de todos os desafios me fizeram enxergar que sou capaz de ir além. Em especial ao professor Otávio Paulino Lavor, Adelson e Francisco Segundo pelo apoio com disponibilidade de conhecimento e materiais para a presente pesquisa.

A meu orientador, por tudo, pelos ensinamentos, pelo trabalho realizado, e também por ter me guiado ao curso de engenharia elétrica.

A banca, pela dedicação e cuidado.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

(Madre Teresa de Calcuta)

RESUMO

Devido à inviabilidade da geração de energia a partir dos combustíveis fósseis faz-se pensar na utilização e desenvolvimento de novas tecnologias para suportar o crescimento econômico mundial. Com o passar dos anos, devido às inúmeras alterações climáticas, surgiu a necessidade de recorrer às fontes renováveis, e nesse sentido a fonte de energia proveniente das massas de ar vem sendo incluída na matriz energética de diversos países. Essa tecnologia avançou a tal ponto de criar grandes turbinas capazes de gerar elevados níveis de potência elétrica. Contudo, dentre diversos fatores, a geração de energia está cada vez mais descentralizada, visando uma melhor distribuição e otimização dos sistemas de geração. Essa tendência é conhecida como geração distribuída, sendo a capacidade reduzida e a praticidade aumentada, surgindo, então, as turbinas de pequeno porte, as quais são utilizadas em residências por possuírem um sistema de aproveitamento do vento com baixa velocidade. Estas são classificadas quanto à sua forma construtiva: de eixo horizontal ou vertical, apresentando diversos modelos construtivos. O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre diversas topologias de turbinas eólicas, enfatizando a aplicação residencial na região do Semiárido Potiguar, sendo a cidade de Pau dos Ferros utilizada como local de análise. Assim, são analisadas as principais topologias de turbinas eólicas de pequeno porte e seus desempenhos frente ao comportamento das massas de ar da região. Como resultado, será mostrada a turbina que apresenta o melhor custo-benefício para aplicação na região do Semiárido Potiguar.

Palavras-chave: Energia Eólica, Semiárido Potiguar, Turbinas para Aplicação Residencial.

ABSTRACT

Due to the impossibility of generating energy from fossil fuels, we think about the use and development of new technologies to support global economic growth. With the passing of the years, due to the numerous climatic conditions, the need arises to resort in renewable sources, and in this sense a proven source of energy of the masses of air has been included in the energy matrix of several countries. This technology has advanced a point of creating large turbines capable of generating electric power levels. However, among several factors, power generation is increasingly decentralized, aiming at a better distribution and optimization of generation systems. This type of tendency is known as distributed generation, being a reduced solution and an increased practicality, appearing then as small turbines, like which are in residential conditions to possess a system of advantage of the wind with low speed. These are classified according to their constructive form: horizontal or vertical axis, presenting several construction models. The present work presents a comparative study among several topologies of wind turbines, emphasizing a residential application in the region of the Potiguar Semi - arid, being a city of Pau dos Ferros as an analysis model. Thus, they are analyzed as main topologies of small wind turbines and their performance fronts to the behavior of the air masses of the region. As a result, a turbine is presented that presents the best cost-benefit for application in the region of the Potiguar Semi-arid.

Keywords: Wind Energy, Semi-Arid Potiguar, Turbines for Residential Application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução dos sistemas eólicos nos últimos 30 anos.....	14
Figura 2. Evolução da geração eólica no Brasil.....	16
Figura 3. Brasil: Capacidade Instalada e Geração das Usinas Eólicas do Nordeste (2017).....	17
Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira, Ano: 2017	18
Figura 5: Modelo de Geração Distribuída da Annel	19
Figura 6: Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica	22
Figura 7: Velocidade dos ventos na cidade de Pau dos Ferros/RN.....	23
Figura 8: Rosa dos Ventos da Pau dos Ferros/RN.....	24
Figura 9: Velocidade Média Sazonal de Vento [m/s].....	25
Figura 10: Tipos de Anemômetros - (a) Cata vento, (b) Copos, (c) ultrassônico.	25
Figura 11: Partes de uma turbina de pequeno porte	30
Figura 12: Sistema Eólico Isolado	31
Figura 13: Representação da estrutura da turbina de eixo vertical.....	34
Figura 14: Representação da estrutura da turbina de eixo horizontal.....	34
Figura 15: Aerogerador com pás de fibra de vidro	35
Figura 16: Túnel de vento e turbina H-Darrieus com 5 pás.....	37
Figura 17: Áreas Barridas	41
Figura 18: Coeficiente de potência em função do λ e do β	42
Figura 19: Curva da Potência em função da velocidade do vento	43
Figura 20: Área A varrida pelo rotor de diâmetro D	45
Figura 21: Curva de Potência da Turbina de Eixo Horizontal.....	46
Figura 22: Representação da área para cálculo da potência	47
Figura 23: Comportamento do vento nas faces da Turbina Savonius	47
Figura 24: Ilustração da turbina Darrieus.....	49
Figura 25: Ilustração da turbina H-Darrieus.....	50
Figura 26: Curva de Potência da Turbina H-Darrieus.....	51
Figura 27: Localização da Residência	56
Figura 28: Localização da Instalação da Turbina na Residência	56
Figura 29: Rosa dos Ventos da Cidade de Pau dos Ferros.....	57
Figura 30: Perfil de velocidades do vento no exterior e no interior de uma urbanização.....	58
Figura 31: comportamento da turbina H-Darrieus e a de Eixo Horizontal dada as variações da velocidade do vento	60
Figura 32: Potência total gerada em cada mês de acordo com a variação de velocidade do vento diária para as turbinas	61
Figura 33: Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade Instalada Mundial	16
Tabela 2: Geração Distribuída: Capacidade Instalada no Brasil (MW).....	20
Tabela 3: Resumo da Revisão bibliográfica	39
Tabela 4: Rotação Nominal de turbinas eólicas de pequeno porte.....	52
Tabela 5: Resumo das topologias analisadas.....	54
Tabela 6: Características das turbinas analisadas.....	59
Tabela 7: Alguns Fabricantes e Representantes de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte.....	62
Tabela 8: Preços de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte	62
Tabela 9: Preços dos demais equipamentos do sistema eólico residencial	63
Tabela 10: Preços das Baterias	64

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa
v	Velocidade do vento
Δt	Variação do Tempo
$\dot{m}$	Massa específica
Q	Vazão
ρ	Densidade Relativa do Ar
A	Área varrida
C_p	Coefficiente de Potência
λ	<i>Tip Speed Ratio</i>
β	Ângulo de Passo das Pás
H	Altura da turbina vertical
η	Rendimento
D	Diâmetro
A_{leme}	Área do Leme
RPM	Rotações por minuto
Z_{min}	Cota Mínima
$\bar{H}$	Altura média dos prédios
A_H	Porcentagem de área da cidade ocupada por edifícios
z_0	Altura da rugosidade do terreno

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APE - Autoprodutores

BEN – Balanço Energético Nacional

BIG - Banco de Informações de Geração

CERNE - Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

COSERN - Companhia Energética do Rio Grande do Norte

CP- Coeficiente de potência

Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileiras S.A

ENERSUD - Indústria e Soluções Energéticas Ltda

EPE- Empresa de Pesquisa Energética

GD – Geração Distribuída

Grid Tie – Conectado a Rede

GSIP- Geradores trifásicos de ímãs permanentes

GWEC - *Global Wind Energy Council*

ICMS – Imposto sobre Operações relativas à Circulação

MME – Ministério de Minas e Energias

MW - Megawatt

Off Grid – Não Conectado a Rede

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PIE - Produtores Independentes

PIS – Programa de Integração Social.

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

PUCRS - Centro de Energia Eólica

RPM - Rotação Por Minuto

SIN – Sistema Interligado Nacional

TARP - *Toroidal Accelerator Rotor Platform*

SUMÁRIO

1. CONHECIMENTOS BÁSICOS	14
1.1. Energia Eólica no Mundo	15
1.2. Energia Eólica no Brasil	16
1.3. Geração distribuída (GD)	19
1.4. Impactos Ambientais	21
1.5. Estudo dos Ventos	22
1.6. Motivação	26
1.7. Objetivos	26
1.8. Contribuições	27
1.9. Organização do trabalho	27
2. ESTADO DA ARTE	29
2.2 Sistema Eólica de Pequeno Porte	29
2.3 Turbinas Eólicas de Pequeno Porte	31
3. ANÁLISE DAS TOPOLOGIAS DE TURBINAS EÓLICAS PARA APLICAÇÃO NO SEMIÁRIDO POTIGUAR	40
3.1 Turbinas Eólicas de Pequeno Porte	40
3.2 Cálculo da Potência	43
3.2.1 Rotor Horizontal	44
3.2.2 Rotor Savonius	46
3.2.3 Rotor Darrieus	48
3.2.4 Rotor H-Darrieus	49
3.3 Geradores Eólicos de Pequeno Porte	51
3.4 Resumo	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Locais de instalação	55
4.2 Turbina Eólica: H-Darrieus e Eixo Horizontal	58
4.3 Custos (Preço)	61
4.4 Sistema Eólico Conectado a rede (sistema <i>Grid Tie</i>)	63
4.5 Sistema Eólico não conectados à rede elétrica (sistema <i>Off Grid</i>): estudo de caso e impactos ambientais	64
4.6 Resumo	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	68

1. CONHECIMENTOS BÁSICOS

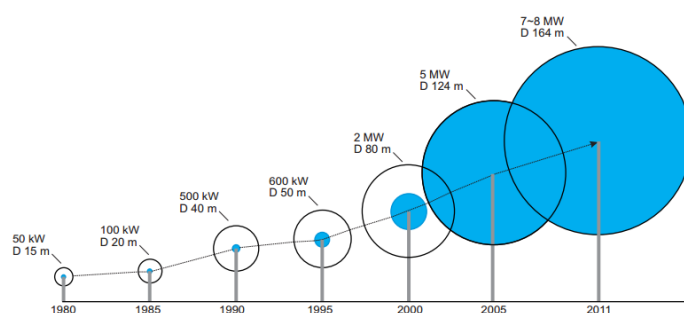
Durante séculos a energia obtida a partir dos combustíveis fósseis deu suporte ao crescimento econômico mundial. Com o passar dos anos, devido às inúmeras alterações climáticas, surgiu a necessidade de recorrer as fontes renováveis. Nesse sentido, a fonte de energia eólica vem sendo incluída na matriz energética por ser uma energia limpa e uma alternativa a sustentabilidade ambiental na geração de energia elétrica (ANEEL, 2008).

Assim, denomina-se energia eólica, aquela advinda das massas de ar em movimento, e para utilizá-la é necessária a conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação (ANEEL, 2005), ou melhor, o movimento de rotação gera a energia mecânica que, através das turbinas eólicas, é transformada em energia elétrica (FELIPE et al, 2010).

Tal conhecimento não é recente, desde os primórdios da civilização tem-se relatos da utilização da força dos ventos pelo homem, usado para impulsionar velas das embarcações, em aparatos de bombeamento de água e até em moinhos de grãos. Os Estados Unidos e a Dinamarca foram os primeiros países a usar a energia eólica como fonte para a geração de eletricidade, no decorrer das décadas de 1940 e 1950, destacando-se na Dinamarca, o primeiro país a conectar a rede elétrica pública a um aerogerador eólico, em 1976 (ANEEL, 2013).

Com os avanços tecnológicos foi possível o desenvolvimento de equipamentos com melhor desempenho e para aplicações com elevados níveis de potência de geração, como mostra a Figura 1. Comparando-se os fatores que influenciam diretamente na potência, em 1985, por exemplo, o diâmetro da turbina era de 20 metros e a altura da torre de aproximadamente 10 metros, hoje o diâmetro supera os 100 metros e a altura da torre ultrapassa os 50 metros (ANEEL, 2008).

Figura 1: Evolução dos sistemas eólicos nos últimos 30 anos.



Fonte: Adaptado de Arrais (2014)

Devido a grande dimensão desses equipamentos, passou a ser necessário um espaço maior para sua instalação, e por isso as usinas eólicas eram construídas longe dos centros urbanos, necessitando-se de linhas de transmissão e distribuição para levar a energia ao consumidor. Hoje, pode-se dizer que essa tecnologia retorna aos primórdios, a fim de evitar as perdas de energia na transmissão e distribuição, ou até mesmo levar energia a lugares onde não tem acesso à eletricidade, a geração voltou a ser próxima às residências (JUNIOR, 2008).

1.1. Energia Eólica no Mundo

O atual cenário mundial acerca da geração de energia elétrica vem se preocupando bastante com as questões ambientais, visando controlar os efeitos causados pelo uso inadequado da natureza, uma vez que, as consequências da geração de energia, sob fontes não renováveis, podem interferir diretamente no aquecimento global, o que nos últimos anos justifica a busca por eficiência energética e as fontes renováveis terem evoluído de maneira significativa (MME, 2015).

Dentre estas, a eólica tem-se destacado no cenário energético mundial por se tratar de uma energia limpa de impactos ambientais mínimos, cujo uso tem se tornado cada vez mais viável economicamente devido aos avanços nas tecnologias de conversores de potência (ANEEL, 2008).

No contexto internacional, de acordo com Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia - SPE/MME, tem-se, como hipótese para a geração de energia total, o equivalente a 15 % proveniente de fonte eólica (7.300 TWh) com fator de capacidade de 32 %, o que resultaria na possibilidade da capacidade instalada chegar a 2.600 GW, representando expansão média anual de 75 GW entre os anos de 2040 e 2050 (MME, 2015).

Fato que já pode ser observado no Brasil, pois ocupou em 2016 a 5ª posição no *ranking* mundial de capacidade instalada, de acordo *Global Wind Energy Council* (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica. Houve assim, uma expansão de 2.014 MW na geração dessa energia no País nesse ano como mostra a baixo.

Tabela 1: Capacidade Instalada Mundial.

País	MW	%
China*	23,328	42,7
Estados Unidos	8,203	15,0
Alemanha	5,443	10,0
Índia	3,612	6,6
Brasil	2,014	3,7
França	1,561	2,9
Peru	1,387	2,5
Países Baixo	887	1,6
Reino Unido	736	1,3
Canadá	702	1,3
Resto do Mundo	6,727	12,3
Total	54,600	100

Fonte: GWEC, 2017.

1.2. Energia Eólica no Brasil

No Brasil, o mercado de energia eólica, ainda que existam barreiras a serem ultrapassadas, já apresenta fatores claros de consolidação, pelo fato de termos hoje preços de eólica comparáveis aos das fontes hídrica e de biomassa. O país apresenta grande potencial e a necessidade de diversificar sua matriz energética direcionando para a geração de energia limpa (CERNE, 2014).

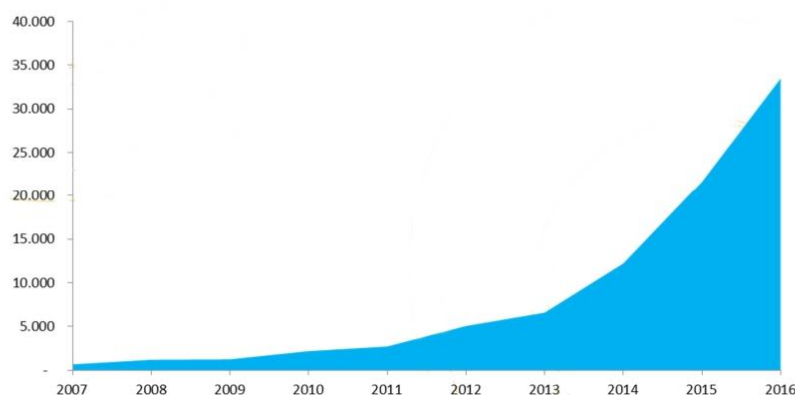
Em 2002, houve um salto na geração de energia eólica no Brasil devido a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA). O programa é gerenciado pela Eletrobrás para investir na expansão do sistema elétrico nacional e possui três pilares que o fortalece. O primeiro refere-se às leis, decretos e resoluções, o segundo, aos programas de apoios financeiros e o terceiro, ao próprio apoio da Eletrobrás (ANEEL, 2008).

Seguidamente, outro fator que influenciou no avanço dos sistemas eólicos foram os leilões reversos, onde o menor preço ganha, aumentando sua capacidade instalada de geração em 75 vezes (ARRAIS, 2014). Com isso, é no Brasil onde se pratica o preço de energia eólica, agora, o mais competitivo do mundo (CERNE, 2014).

De acordo com o Balanço Energético Nacional do ano de 2017 tido como base o ano de 2016, a evolução da geração eólica foi expressiva, chegou a atingir 33,5 TWh, com um crescimento de 54,9 % como mostra a Figura 2. E a potência eólica atingiu 10.124 MW, uma expansão de 32,6 %.

Figura 2. Evolução da geração eólica no Brasil.

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	$\Delta 16/15$
663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.578	12.210	21.625	33.489	54,9%

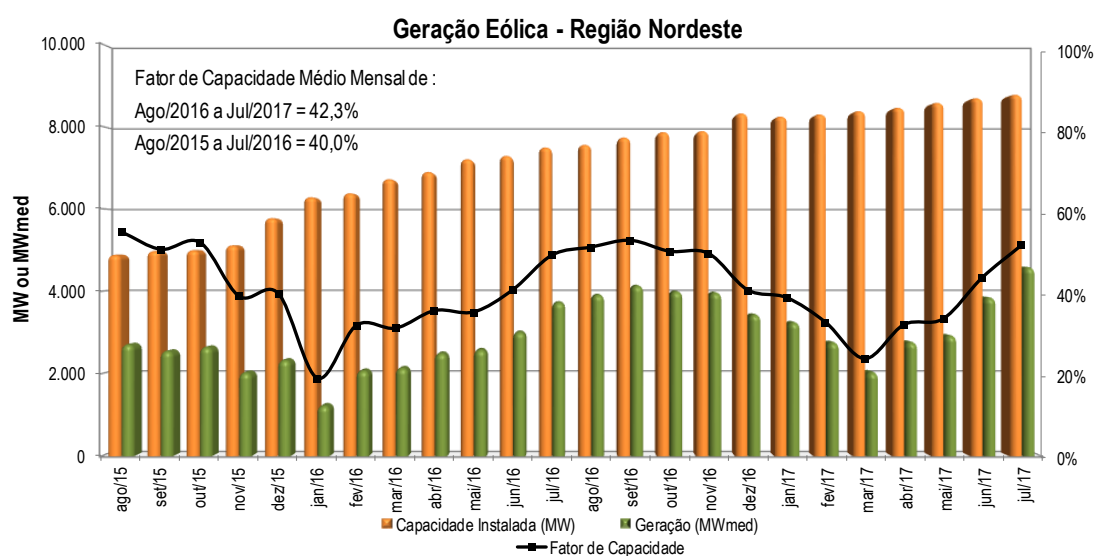


Fonte: MME, 2017

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, o potencial eólico era da ordem de 143 GW, quando as torres eram de 50 metros em 2001, hoje com torres a cima de 100 m esse valor passaria a ser de 880 GW. Sendo a região Nordeste com o maior potencial (MME, 2015).

No nordeste, de acordo com o boletim de monitoramento do sistema elétrico (MME, 2017), o fator de capacidade médio, em relação ao acumulado nos últimos 12 meses, atingindo o valor de 42,3 % em relação capacidade instalada no Brasil, Figura 3.

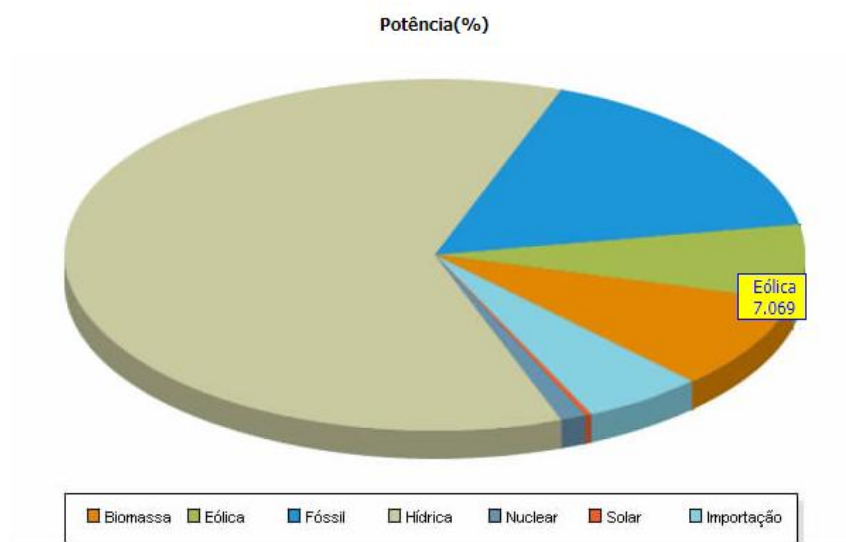
Figura 3. Brasil: Capacidade Instalada e Geração das Usinas Eólicas do Nordeste (2017)



Fonte: Adaptado de MME, 2017

Atualmente, segundo dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da Aneel, a matriz de energia elétrica do Brasil possui uma capacidade instalada na ordem de 162 GW, sendo 7,09 %, Figura 4, correspondente à fonte eólica distribuída em 470 usinas.

Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira, Ano: 2017



Fonte: Aneel, 2017

O estado do Rio Grande do Norte possui cerca de 3,6 GW, Figura 5, de produção eólica, com 125 parques instalados nos municípios de Rio do Fogo, Guamaré, Macau, Parazinho, João Câmara, Areia Branca, Galinhos, São Bento do Norte, Bodó, Pedra Grande, São Miguel do Gostoso, Lagoa Nova, Tenente Laurentino Cruz, Touros, Ceará-Mirim, Serra do Mel, Jandaíra e Santana do Matos (ANEEL, 2017).

Figura 5: Principais estados brasileiros em produção de energia eólica no Brasil

Estado	Capacidade eólica instalada em 2013 (MW)	Potencial energético em 2018 (MW)
Rio Grande do Norte	1.339,2	3.654,2
Ceará	661,0	2,325
Bahia	587,6	1.978,9
Rio Grande do Sul	460,0	1978,9
Santa Catarina	236,4	236,4

Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica

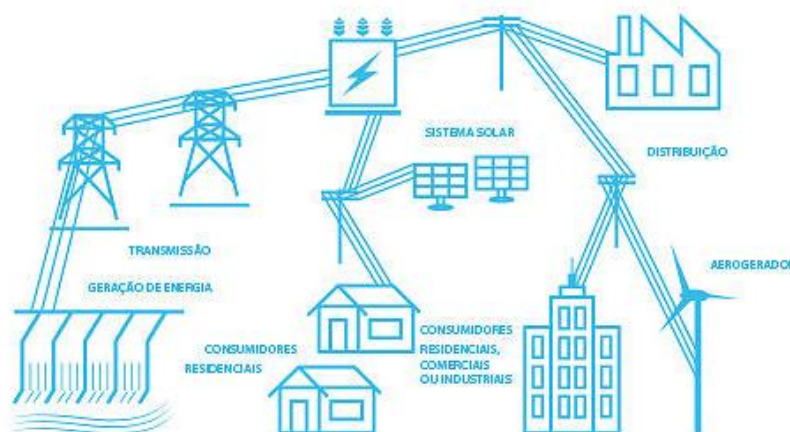
Hoje, o uso de fontes eólicas já se disseminou por todo o país, seja a partir da geração centralizada, com grandes usinas eólicas, ou com geração distribuída, com os agentes geradores, autoprodutores e produtores independentes, buscando a máxima eficiência energética da região.

1.3. Geração distribuída (GD)

No tocante a geração distribuída (GD) de energia elétrica, cujo crescimento tem sido incentivado por parte do governo, atingiu-se 104,1 GWh com capacidade instalada de 72,5 MW em 2016, sendo 0,2 MW de fonte eólica (MME, 2017).

O termo geração distribuída é caracterizado pela instalação de geradores de pequeno porte em residências, unidades comerciais ou unidades industriais para atender parte da demanda local, como mostra a Figura 6. Para essa geração é utilizado de fontes renováveis ou com elevada eficiência energética. (ANEEL, 2016). Outras expressões normalmente usadas são: autogeração, geração *in situ*, cogeração e geração exclusiva.

Figura 6: Modelo de Geração Distribuída da Aneel



Fonte: Energy Green, 2015.

Os benefícios desse tipo de empreendimento estão relacionados com baixo impacto ambiental, a diversificação da matriz energética, a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica, entre outros. Além de, para uma maior eficiência, as tecnologias desse tipo de geração tem evoluído incluindo níveis de potências cada vez menores, fazendo com que os equipamentos se adaptem à oferta de energia local (FILHO E AZEVEDO, 2013).

As desvantagens de seu uso estão ligadas principalmente ao custo de implantação do projeto e ao seu tempo de amortização por ser um mercado novo. Para o produtor independente, a interligação à rede acarreta redução de autonomia, por não ser mais permitido visar apenas à maximização do próprio benefício (FILHO E AZEVEDO, 2014).

Mas há incentivos governamentais, com o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, criado pela ANEEL no ano de 2012, o consumidor pode gerar sua própria energia

elétrica, e também disponibilizar o excedente para a rede de distribuição de sua localidade recebendo em “créditos de energia” que, posteriormente, abaterá o consumo (ANEEL, 2016).

Dessa forma, cabe ao consumidor analisar a viabilidade da instalação desse tipo de empreendimento e existem diversos fatores a serem considerados, dentre eles o tipo da fonte de energia, a tecnologia dos equipamentos de geração, a localização (rural ou urbana), e o custo/benefício para instalação dos geradores. Dentre as diversas fontes de energia, destaca-se a energia eólica que usam de micro ou minigeradores para geração da energia elétrica (ANEEL, 2016).

Vale ressaltar, que os microgeradores e minigeradores distribuídos funcionam a partir da força dos ventos com potência suficiente para produzir eletricidade, e de acordo com a Resolução Normativa REN 687-2015 é a potência que classifica como microgeradores aqueles com potência instalada menor ou igual a 75 kW e minigeradores os de potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW.

Além disso, a geração distribuída pode ser feita por Agentes Geradores, Autoprodutores (APE) e Produtores Independentes (PIE), sendo regido por um conjunto de normas de comercialização da energia elétrica. Os autoprodutores¹ e os produtores independentes² estão regulamentados pela Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, o Decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996 e a Resolução Normativa nº 247, de 21 de dezembro de 2006 (MENDES e PINTO, 2011).

Dentre as fontes utilizadas, a eólica tem evoluído gradativamente, embora ocupe um patamar relativamente baixo de produção. Com os incentivos governamentais objetiva-se a elevação na produção em um futuro próximo. No Brasil, essa geração tem produzido cerca de 0,2 MW da capacidade instalada, correspondendo a 0,27 % da capacidade disponível (MME, 2017).

Tabela 2: Geração Distribuída: Capacidade Instalada no Brasil (MW)

Fonte	2015	2016
Hidráulica	0,8	4,4
Térmica	2,3	11,0
Eólica	0,1	0,2
Solar	13,3	56,9
Capacidade Disponível	16,5	75,2

Fonte: MME, 2017

¹ Autoprodutor de Energia Elétrica, a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

² Produtor Independente de Energia Elétrica, a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

1.4. Impactos Ambientais

A geração de energia elétrica a partir da fonte eólica pode causar impactos ambientais, e dentre eles destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são desconfortos ocasionados pelo ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos. Já os impactos visuais derivam do aglomerado de torres e aerogeradores no ambiente instalado (ARAÚJO, 1996 apud ANEEL, 2005).

Além destes mencionados, outros impactos estão relacionados com: a extensa ocupação de terras, devido a distância necessária entre as turbinas, as mortes das aves, devido o impacto com as pás das turbinas, e em um caso mais particular quando as turbinas são instaladas entre os receptores e transmissores de ondas (rádio, televisão e microondas) causando a interferência eletromagnética (ROSSI e OLIVEIRA, 2017?).

Em suma, para os grandes parques eólicos pode-se dizer que os impactos ambientais variam de acordo com o local a ser instalado, o arranjo, e as especificações das turbinas. Já se tratando da geração distribuída, ou seja, a instalação de micro e minigeradores eólicos os impactos ambientais são reduzidos (ANEEL, 2005).

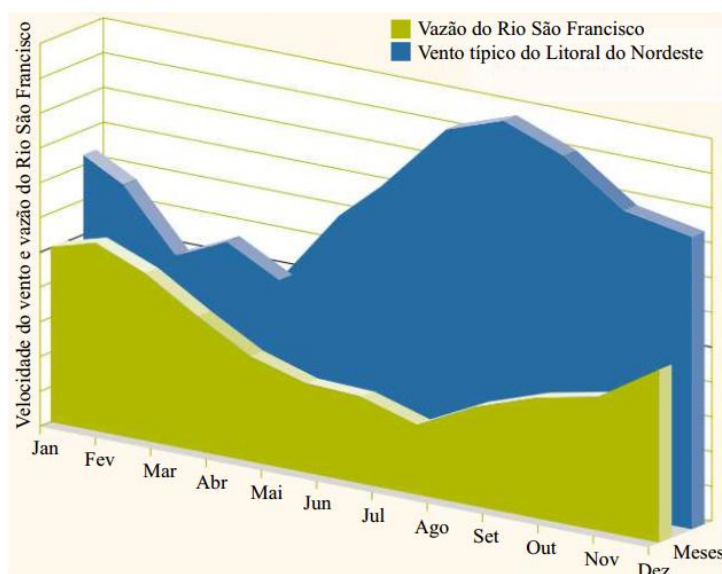
A instalação de micro e minigeradores eólicos implicam no dimensionamento da estrutura para se adequar ao espaço reduzido, buscando conciliar desenvolvimento sustentável, conforto energético e benefícios socioambientais.

A geração elétrica proveniente de geração distribuída eólicas apresenta diversos benefícios para o sistema elétrico (ANEEL, 2016), dentre elas temos:

- Baixo impacto ambiental, se comparados às outras fontes de energia;
- Diminuição do uso de fontes de energia não renováveis;
- Diminuição do desmatamento, visto que a instalação é de pequeno porte;
- Diversificação da matriz energética, incluindo novas fontes de energia;
- Contribuição na redução das emissões de gases de efeito estufa;
- Redução de investimentos nos sistemas de distribuição e transmissão;
- Melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada;

Além dos benefícios mencionados, vale ressaltar a importância de tal fonte possibilitar a complementaridade da geração hidrelétrica, pois seus maiores índices, no Nordeste, ocorrem durante o período de menor disponibilidade hídrica, Figura 7 (ANEEL, 2013).

Figura 7: Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica



Fonte: Arrais, 2008

Assim, instalar micro e minigeradores eólicos em residências pode impactar ambientalmente na questão de emissões de ruídos. Contudo, a própria residência pode atuar como uma caixa de ressonância, pois as torres de sustentação têm cabos tensionados que, dependendo da intensidade do vento, podem fazer barulho. Na questão visual, as pás do aerogerador podem fazer sombras e reflexos na vizinhança (INSTITUTO IDEAL, 2014).

Portanto, a fim de evitar transtornos à população vizinha, o nível de ruído das turbinas deve atender às normas técnicas da ABNT nº 10.151 e 10.152 (FILHO e AZEVEDO, 2013). Vale salientar que apesar de efeitos negativos, como alterações na paisagem natural, esses impactos ambientais tendem a atrair turistas, gerando emprego e promovendo o desenvolvimento regional (ANEEL, 2015).

1.5. Estudo dos Ventos

A energia dos ventos é uma fonte abundante disponível em todos os lugares. Essas massas de ar possuem uma direção, uma velocidade e estão diretamente vinculadas com sua região de origem. A velocidade do vento em um determinado local aumenta com a altura e depende do que está construído no seu entorno (ROSSI e OLIVEIRA, 2017).

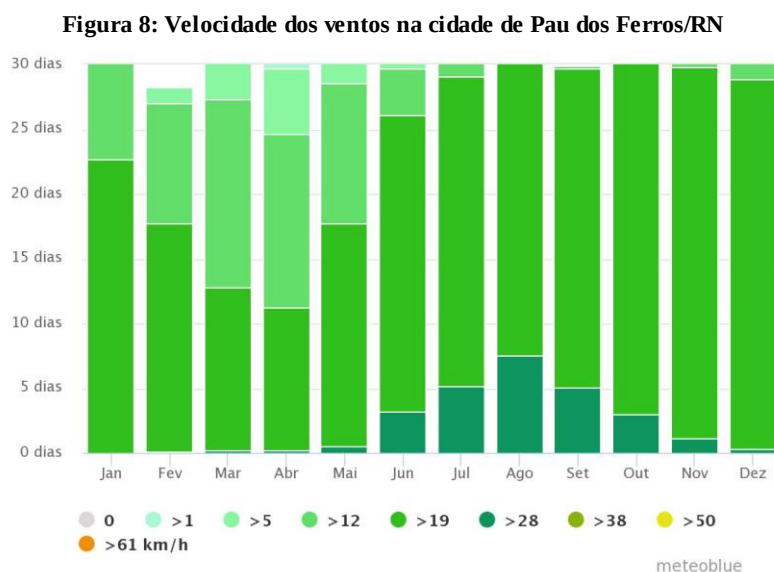
É necessária uma determinada velocidade dos ventos para gerar energia suficiente que acione as máquinas eólicas. Vale ressaltar que sua disponibilidade varia com o cubo da

velocidade do vento, de forma que o dobro de velocidade representa um aumento de oito vezes em energia (ROSSI e OLIVEIRA, 2017).

Os sistemas eólicos de pequeno porte estão mais próximos do solo se comparados aos grandes aerogeradores, por esse motivo o local de instalação deve ser analisado visando possíveis obstáculos que venham a influenciar no comportamento dos ventos. Dessa forma, a instalação das turbinas eólicas é indicada para o topo das edificações, mantendo-se distantes de outros edifícios, árvores e eventuais obstáculos (INSTITUTO IDEAL, 2014).

De modo geral os ventos variam de acordo com as coordenadas do local. No Semiárido Potiguar, região do Rio Grande do Norte, tomando como base a cidade Pau dos Ferros, que está localizado geograficamente a 6.1123° S e 38.2052° W, tem-se um comportamento dos ventos anuais, de acordo com CRESESB, de 3,93 m/s.

Analisando o comportamento dos ventos, de acordo com o Meteoblue, na Figura 8, apresenta-se o comportamento das massas de ar durante o período de um ano, enfatizando o comportamento diário para cada mês do ano, para a cidade de Pau dos Ferros/RN.

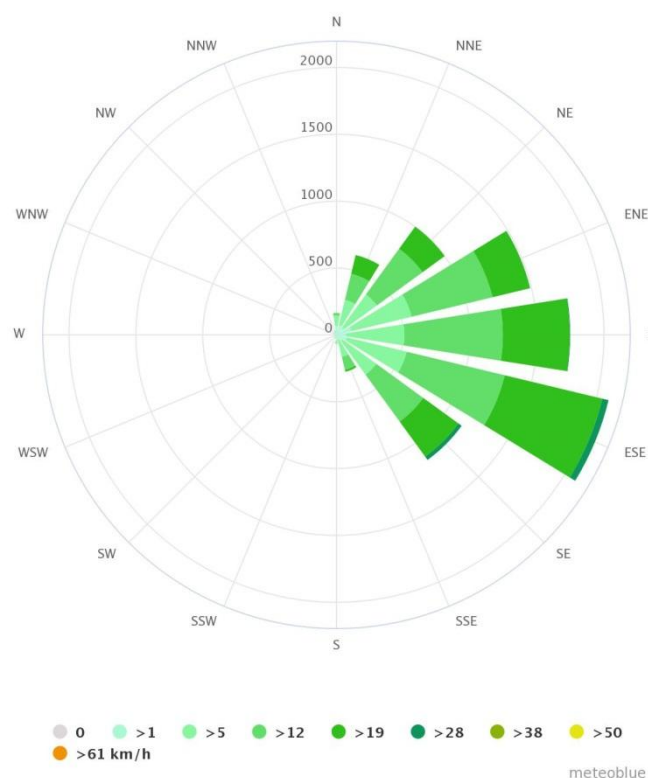


E como para obter o maior proveito de suas ações é necessário conhecê-lo, além da velocidade, a direção depende da região de origem. A Figura 9 representa a Rosa dos Ventos da cidade de Pau dos Ferros/RN, mostrando quantas horas por ano o vento sopra na direção indicada (METEOBLUE, 2006-2017).

Vale ressaltar que a Rosa dos Ventos é uma forma de representação de frequência estatística da velocidade do vento, da sua direção e a densidade de potência. Sua

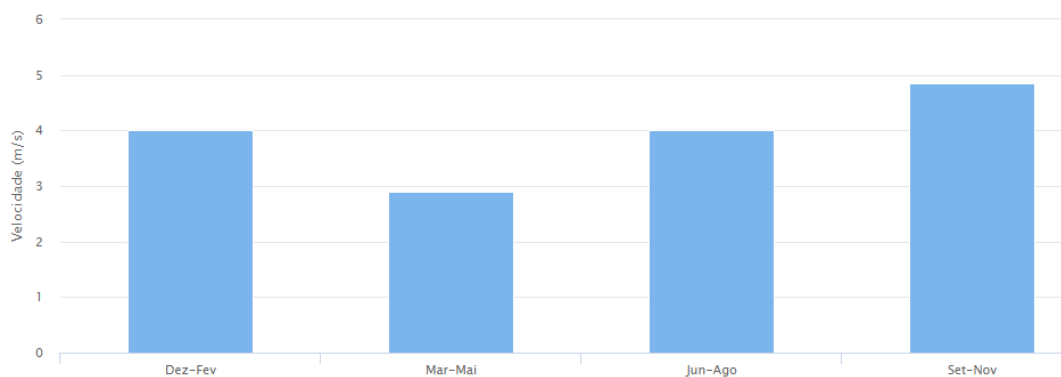
representação é no formato de uma estrela e tem por finalidade facilitar a visualização do sentido de incidência dos ventos, além disso, por meio dela, situamos o espaço representado em relação à Terra e a outros espaços dela. A mesma indica as direções conhecidas como pontos cardeais (Norte (N), Sul (S), Leste (L) e Oeste (O)), os pontos colaterais (nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste) e os pontos subcolaterais (AMÊNDOLA, 2007).

Figura 9: Rosa dos Ventos da Pau dos Ferros/RN



Fonte: Meteoblue, 2006-2017

Quanto ao regime da velocidade média sazonal de vento, Figura 10, considerou-se a 50 m de altura a partir do mar para a cidade de Pau dos Ferros/RN, obtido a partir das coordenadas 6,1123° S; 38,2052°O de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

Figura 10: Velocidade Média Sazonal de Vento [m/s]

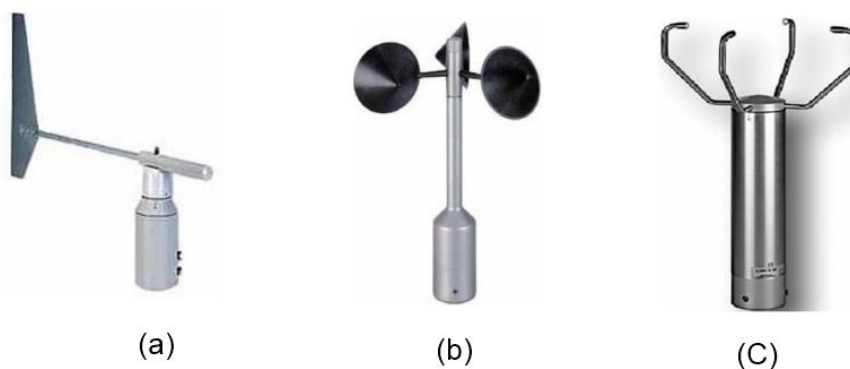
Fonte: CRESESB - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

Para a análise do comportamento dos ventos é feita medições de sua velocidade durante um determinado período de tempo. Esse estudo é feito com um aparelho chamado anemômetro, indicado na Figura 11, que mede a velocidade de escoamento do fluido. Existem diferentes tipos de anemômetros, que a priori podem ser classificados de anemômetros de rotação e anemômetros de pressão (JUNIOR, 2008).

Além desses, existe no mercado os anemômetros de copos, cata-ventos e ultrassônico que são bastante utilizados na medição da velocidade média do vento. São constituídos por partes móveis e dependem do seu equilíbrio dinâmico com o escoamento (JERVELL, 2008) (PINTO, 2006).

O funcionamento do anemômetro de copos, Figura 11 (b), passa pela transformação do movimento rotativo em informação sobre o escoamento das massas de ar. Para cada rotação em torno do eixo vertical é enviado um sinal para o sistema de aquisição de dados que o mesmo irá fornecer informações a respeito do vento sob a forma de médias. Já o anemômetro do tipo cata vento, Figura 11 (a), segue o mesmo princípio levando-se em consideração a direção do vento. Por fim, o anemômetro ultra-sônico, Figura 11 (c), possui sensores ultrassônicos na sua extremidade superior que são responsáveis por medir a velocidade do vento (JERVELL, 2008), (PINTO, 2006).

Figura 11: Tipos de Anemômetros - (a) Cata vento, (b) Copos, (c) ultrassônico.



Fonte: Adaptado de Jervell, 2008, p. 20 e Pinto, 2006, p. 19

1.6. Motivação

Com o aumento do consumo de energia elétrica e a escassez das fontes energéticas, devido às inúmeras alterações climáticas, surgiu a importância de recorrer à fontes alternativas. Como a matriz de energia eólica no Brasil e, em especial, no Rio Grande do Norte, tem evoluído bastante, surge assim, a necessidade de investir em estudos sobre essa fonte.

Em virtude do Rio Grande do Norte ter um elevado potencial eólico disponível e a grande maioria das usinas eólicas estarem situadas nas zonas litorâneas, devido a maior incidência dos ventos, vê-se a necessidade de fontes alternativas pontuais em regiões afastadas dos grandes centros. Que é o caso de regiões no Sertão do País, como o Semiárido Potiguar, devido à carência de energia elétrica.

Assim, uma motivação para o presente trabalho vem a ser a busca por indicar um sistema de geração de energia eólica de pequeno porte que contribua com o desenvolvimento social e econômico dessa região, visto o potencial eólico disponível.

Então, a relevância do presente trabalho pauta-se em ser imperativo o estudo das topologias das turbinas eólicas, que se enquadrem na frequência dos ventos presentes no Semiárido Potiguar, para a produção dessa energia e sua utilização em residências.

Pretende-se com isso mostrar a importância de se reunir tais conhecimentos e disponibilizar um material que aponte uma turbina com melhor eficiência e custo-benefício, a fim de embasar a instalação de pequeno porte aplicada a residências.

1.7. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar as topologias das turbinas eólicas e apontar a melhor opção a ser aplicada para uso residencial na região do Semiárido Potiguar, tomando como base a cidade de Pau dos Ferros.

Atrelando a esse direcionamento, tem-se como objetivos específicos:

- Estudar os ventos na cidade de Pau dos Ferros, e regiões circunvizinhas e as topologias de turbinas eólicas para aplicação residencial buscando fundamentar a escolha da topologia adequada à região;
- Analisar o custo das principais turbinas eólicas aplicadas para uso residencial, enfatizando a eficiência para a aplicação na região e destacar os apontamentos levantados pelas normas técnicas, resoluções e impactos ambientais relacionados à instalação desse tipo de cogeração em ambientes áridos;
- Apontar uma turbina com melhor eficiência e custo-benefício para aplicação ao Semiárido Potiguar.

1.8. Contribuições

Visando contribuir com o desenvolvimento social e econômico da região do Semiárido Potiguar, o presente trabalho busca analisar o potencial eólico da região e com isso disponibilizar um material que reúna características de uma topologia de turbina mais eficiente para o potencial eólico disponível. Dessa forma, pode-se listar as seguintes contribuições:

- Disponibilizar um material que auxilie a compreender cada componente de um sistema eólico de pequeno porte;
- Indicar uma turbina eficiente para a região do Semiárido Potiguar;
- Sugerir uma turbina para uso em locais que não tenham acesso a redes de energia elétrica, possibilitando assim ter seu próprio sistema de geração;
- Incentivar o uso da turbina conectada a rede elétrica, quando houver acesso, mostrando que em caso de geração excedente haverá retorno econômico;

Apresentando assim, de forma bem detalhada, uma estrutura autocomplementar no tocante a linha investigada subdividia em quatro capítulos como se pode ver a seguir.

1.9. Organização do trabalho

Uma vez conhecidos tais conceitos básicos é possível ter uma visão delineadora do estudo em andamento e apresentar uma confluência de ideias que direciona a busca de solução para questão levantada. Assim, por essa razão o trabalho está organizado em quatro capítulos:

- Capítulo 1: Apresenta uma introdução geral dos sistemas eólicos.
- Capítulo 2: Apresenta o estado da arte das principais topologias de turbinas eólicas usadas em residências.
- Capítulo 3: Apresenta a análise das turbinas aplicadas no Semiárido Potiguar.
- Capítulo 4: Apresenta os resultados da turbina com melhor eficiência e custo benefício para aplicação residencial no Semiárido Potiguar.

Logo, detalhado os sistemas eólicos passa-se a conhecer as topologias e como se dar sua aplicação mediante o estado da arte mais recente disponível.

2. ESTADO DA ARTE

O estudo da aplicação das topologias de turbinas eólicas de pequeno porte vem sendo desenvolvido, tanto por institutos de pesquisa públicos como por parte da iniciativa privada, além de diversas empresas atuantes no mercado. Neste capítulo, é apresentada uma análise teórica do estado da arte dos sistemas eólicos de pequeno porte, a partir de dissertações e publicações científicas que nortearam a realização deste trabalho levando-se em consideração as principais tecnologias desenvolvidas até os dias atuais.

2.2 Sistema Eólica de Pequeno Porte

No contexto energético atual, os sistemas eólicos de pequeno porte se apresentam como uma das tecnologias mais promissoras do mercado. O motivo principal está relacionado à melhoria significativa da tecnologia das turbinas eólicas de baixa potência, onde é possível o aproveitamento da energia com baixas velocidades do vento, e a diminuição no custo para instalação de sistemas residenciais (INSTITUTO IDEAL, 2014).

Atualmente, o Brasil possui 45 instalações de micro e minigeradores eólicos (ANEEL, 2017), e de acordo com o MME (2016) o consumo de eletricidade residencial foi de 131,2 GWh equivalente a 21,3 %. A tendência é aumentar esse número nos anos vindouros com a nova regulamentação da ANEEL, onde a geração descentralizada tornou-se viável economicamente para consumidores residenciais de quase todo o país.

Com esse tipo de geração, além das vantagens mencionadas, ainda é importante ressaltar a valorização do imóvel, já que uma vez instalado na residência irá diminuir, ou até eliminar, o valor na conta de energia. Além disso, há a contribuição na redução dos impactos ambientais e a eliminação das perdas com transmissão e distribuição (INSTITUTO IDEAL, 2014).

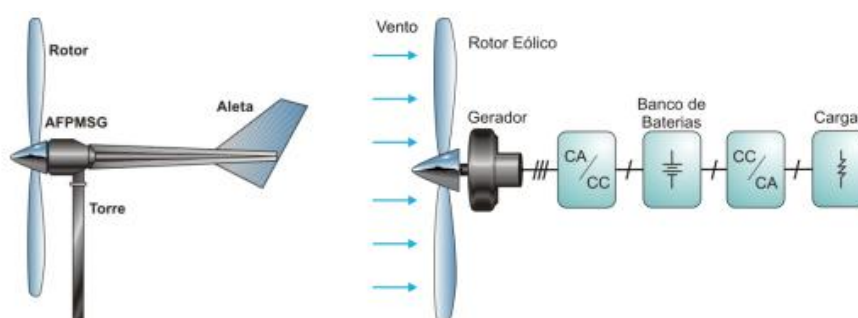
O sistema de geração residencial pode ou não estar interligado a rede elétrica. Quando interligada, no caso de excedente de energia, há o ganho de créditos com a concessionária, não estando interligada à rede é dita como autoprodutor e a energia gerada é utilizada apenas para consumo próprio (INSTITUTO IDEAL, 2014).

Esses sistemas obedecem a uma configuração básica que deve trabalhar em harmonia com o objetivo de proporcionar um maior rendimento. Em geral, necessitam de uma unidade de controle de potência e, dependendo da aplicação, de uma unidade de armazenamento. Minuciosamente tem-se, o rotor, a nacelle, o suporte, o controlador, o inversor e o sistema de armazenamento (BENITO, 2012), (TIBOLA, 2009).

O rotor é formado por um cubo do rotor, pás (duas, três ou mais) e o veio de transmissão, que tem por função captar a energia cinética e transformar em mecânica. O suporte é o meio de sustentação do aerogerador e varia, de acordo com a necessidade, tanto na composição como no comprimento. E a Nacele é a envolvente metálica do equipamento onde ficam os principais componentes, como por exemplo a engrenagem, eixo e gerador (BENITO, 2012).

Além do rotor e do suporte, o sistema eólico residencial também é composto por um controlador (dispositivo que orienta, monitora e controla a rotação e o sistema de freios do aerogerador), um inversor (que converte a energia contínua gerada pelo aerogerador em corrente alternada) e um sistema de armazenamento (responsável por armazenar a energia gerada) (INSTITUTO IDEAL, 2014).

Figura 12: Partes de uma turbina de pequeno porte

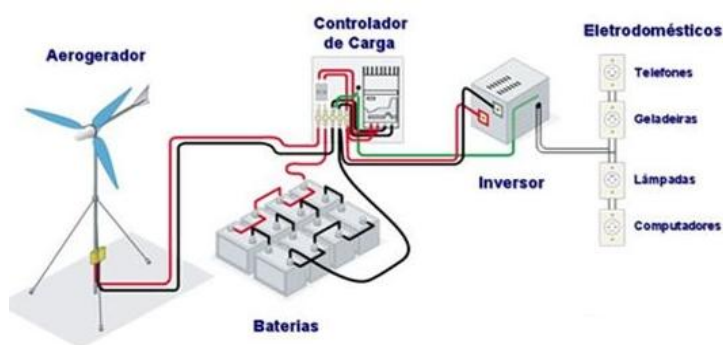


Fonte: Adaptado de TIBOLA, 2009, p.94

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. É dito isolado, Figura 13, quando o sistema não é conectado à rede, ou seja, necessita de um sistema de armazenamento para a energia gerada. Nos sistemas híbridos, a energia gerada é obtida a partir de duas ou mais fontes de energia, por exemplo, a eólica e solar e é desconectado da rede convencional. E por fim, os sistemas interligados à rede não necessitam de sistema de armazenamento, pois a energia gerada é direcionada para a rede elétrica (CRESESB, 2015).

Em todas as aplicações mencionadas é necessário uma velocidade mínima do vento, chamada de velocidade de entrada, para que o sistema eólico comece a funcionar, na mesma forma que existe uma velocidade máxima do vento permissível, chamada de velocidade de corte, para evitar riscos ao rotor e à estrutura e uma velocidade nominal. Quando o sistema atinge esse limite máximo é acionado um mecanismo de proteção fazendo com que o microgerador eólico desligue (TIBOLA, 2009).

Figura 13: Sistema Eólico Isolado



Fonte: CRESESB, 2008

Segundo o Instituto Ideal (2014), para a manutenção de um sistema eólico de pequeno porte são necessários alguns cuidados, tais como:

- Monitoramento no aparecimento de algum ruído fora do padrão no sistema;
- Quando baixos índices de ventos, verificar o estado das pás do aerogerador.
- Em datas pré-estabelecidas, verificar o sistema para avaliar se o gerador ou a torre apresentam alguma vibração visível;
- Acompanhamento da produção de energia verificando e corrigindo eventuais falhas de forma imediata;
- No caso de ventos superiores a velocidade máxima permitida, verificar possíveis danos;

2.3 Turbinas Eólicas de Pequeno Porte

As principais tecnologias de turbinas eólicas de pequeno porte são formadas por eixo horizontal ou vertical e funcionam com velocidade fixa ou variável. As de eixos horizontais são mais comuns no mercado e possuem maior eficiência, já as de eixo vertical interagem melhor com as edificações, porém possui baixa eficiência (INSTITUTO IDEAL, 2014) (WENZEL, 2007).

Segundo Cardoso e Ferreira (2015) essa baixa eficiência das turbinas verticais está relacionada ao processo de rotação (giro) das pás, quando uma das pás atravessa o escoamento na direção contrária ao sentido de escoamento ao qual foi projetado, gerando uma baixa potência.

No final do século XIX, a Dinamarca iniciou a geração de eletricidade utilizando as forças do vento, e no início do século XX os Estados Unidos começou a expansão do uso de aerogeradores de pequeno porte nas fazendas e residências rurais isoladas (CRESESB, 2017). Porém, os primeiros estudos relacionados às turbinas eólicas de pequeno porte se remetem aos anos de 1931 (TIBOLA, 2009).

A partir desta data, a tecnologia adentrou o mercado e diversos cientistas, pesquisadores e afins passaram a discuti-las e aplica-las. Wenzel (2007) propôs um projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal, onde a partir desses perfis aerodinâmicos, com propriedades conhecidas, é possível definir sua eficiência.

Já Argentino e Beppu (2007) fabricaram um protótipo de uma turbina eólica de pequeno porte de eixo horizontal, que apesar da produção de energia elétrica da microturbina não ser suficiente para abastecer uma residência, ainda produziu cerca de 2 a 3 W. Assim, para atender a maiores demandas foi projetado a microturbina com dimensões maiores, com novo diâmetro 5 vezes o anterior, e para o dimensionamento do sistema de conversão eólico-elétrico em uma pequena instalação levou-se em consideração alguns critérios, dentre eles a velocidade média do vento do local a ser instalado, o consumo diário da edificação, entre outros.

Almeida *et al.* (2008) buscou determinar a potência máxima de um sistema eólico de pequeno porte, a partir de medições meteorológicas durante um dado período de tempo, utilizando um datalogger CR23x da CAMPBELL para obter os valores da massa específica e da eficiência de conversão eletromecânica através de sensores meteorológicos e elétrico.

De posse desses valores, e a partir da velocidade obtida pelo anemômetro RM-YOUNG WIND MONITOR, foi possível determinar a potência máxima do gerador eólico no período analisado. Vale ressaltar que levou-se em consideração alguns parâmetros, que variaram de acordo com a região, determinantes para a viabilidade da instalação dos aerogeradores.

Junior (2008) implementou uma metodologia para 2 protótipo de turbinas eólicas de pequeno porte com capacidade nominal de 300W e 1000W, onde foram realizados alguns testes inovadores, tais como aerodinâmicos e elétricos, e também a aplicação de modelos matemáticos que descreveram o comportamento do sistemas.

Vale salientar que um dos projetos está em execução, em Campos, RJ, e se apresenta em perfeito estado gerando cerca de 5 kW de energia elétrica. Foram realizados testes de campo para a análise da eficiência onde foi determinada a curva de potência, o nível de ruído e a atuação do nível de segurança. Para os testes de protótipo em laboratórios foram

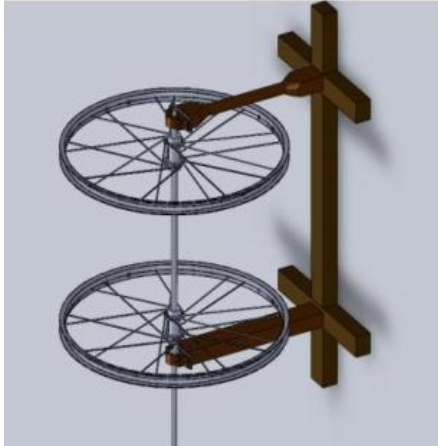
construídos protótipos dos perfis das hélices e da máquina de 5 kW, logo após foi submetido ao túnel de vento. Por fim, com o sistema eólico montado foi então realizado teste em campo e concluída a eficiência da turbina eólica de pequeno porte.

Já um sistema eólico de pequeno porte para carregamento de baterias foi estudado por Tibola (2009). Com o objetivo de obter um maior aproveitamento da energia eólica fez-se um estudo, simulou e projetou um dimensionamento de conversores capazes de rastrear a máxima potência e aperfeiçoar o sistema. Seu sistema eólico de pequeno porte consiste em uma turbina com três pás com gerador síncrono a ímã permanente, conversor e um banco de baterias. Foram abordados três conversores básicos: O Boost, SEPIC e Buck, e após ser feito o equacionamento para estes modelos foi aplicado o método de rastreamento de máxima potência. Vale resaltar que foi feita uma implementação do conversor Buck para comprovar os modelos e teorias estudadas e que apesar dos resultados práticos de rastreamento não terem apresentado resultados significativos, a implementação de conversores, quando bem projetados, fará com que se extraia mais potência quando ligados a baterias.

Simonsen (2009) aplicou três diferentes topologias de turbinas eólicas de pequeno porte a fim de verificar qual apresentava maior rendimento dado o potencial eólico local. As topologia de turbinas analisadas foram as de eixo horizontal, H-Darrieus e a Savonius, onde para a obtenção de seus desempenhos foram feitos testes em uma residência localizada nas margens da represa Gurapiranga, em São Paulo. Com o objetivo de criar um protótipo sustentável, os materiais utilizados foram materiais reaproveitáveis, sendo a base feita de madeira peroba, para a fixação das pás usou o auxílio de rodas de bicicletas com diâmetro de 60 cm e uma distância entre as rodas de 50 cm, e para a fixação das rodas no eixo usou uma barra roscada de aço carbono de 13 mm de diâmetro e por fim, foi usado um rolamento do tipo rígido de esfera em carreira como mostra a Figura 14 e Figura 15.

Simonsen (2009) fez um estudo teórico para as turbinas de eixo horizontal e para a H-Darrieus, porém não fez para a Savonius, devido à complexidade da dinâmica do escoamento do ar na turbina. Concluiu-se que a turbina de melhor desempenho foi a de eixo horizontal e os resultados obtidos experimentalmente coincidiram com os teóricos, e embora que as turbinas tenham gerado baixa potência, é viável a sua aplicação para maiores dimensões.

Figura 14: Representação da estrutura da turbina de eixo vertical



Fonte: Simonsen, 2009

Figura 15: Representação da estrutura da turbina de eixo horizontal



Fonte: Simonsen, 2009

Almeida e Silva (2011) desenvolveram uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte, onde usou dois modelos de pás feitas com materiais diferentes a fim de verificar qual oferecia melhor resultado. O projeto de turbina eólica de pequeno porte proposto possui uma potência de 200 W e o raio de 1,1853 m, onde as pás foram feitas com fibra de vidro representada da Figura 16. Já a segunda turbina na qual foi usada para fim de comparação, construída e disponibilizada pelo professor, as pás eram feitas de fibra de carbono. Concluindo o estudo teve-se que a turbina com pás de fibra de carbono apresentou um melhor resultado gerando energia a velocidades inferiores as da pás de fibra de vidro.

Figura 16: Aerogerador com pás de fibra de vidro



Fonte: Adaptado de Almeida e Silva (2011)

Foi introduzido por Carmo (2012) um conceito de perfis multielementos no seu projeto de turbina eólica, com eixo vertical do tipo H-Darrieus, para a aplicação em meio urbano com o intuito de prever, até que ponto, o arranjo apresentava valores de coeficientes mais altos e mais baixos. Sua dissertação consiste na projeção dessa turbina com potência de 1,2 kW sob uma velocidade do vento de 10 m/s situado no topo do edifício e estando sujeito a diferentes valores de velocidades de rotação e velocidade de vento. Foi usado o programa *JavaFoil* para o estudo dos arranjos de perfis multielementos e para a obtenção do coeficiente de potência, já para o fator de bloqueamento da turbina usou um modelo teórico, porém para este cálculo necessitou do conhecimento do coeficiente de sustentação e resistência aerodinâmica dos perfis e estes foram retirados de valores obtidos pelos laboratórios SANDIA. O projeto inclui também um projeto estrutural da turbina no qual o autor usou o software *Solidworks Simulation* para obtenção dos valores necessários para os cálculos. Por fim, o mesmo conclui mostrando a obtenção do rotor que apresenta as melhores condições estruturais.

Sobre uma tecnologia inovadora é levantado um estudo bibliográfico por Pinto e Neto (2012), no qual é abordada a aplicação de aerogeradores de pequeno porte no contexto das redes inteligentes (*smart grids*). Consiste em um sistema totalmente monitorado em tempo real que proporciona o fluxo de potência bidirecional na rede elétrica utilizando recursos computacionais para melhorar a eficiência e a segurança do sistema. Neste trabalho é

mostrada a viabilidade da tecnologia com a qual o consumidor passará a atuar ativamente no processo de geração, além de possuir o controle do seu consumo de energia elétrica.

Verdum (2013) propôs um projeto de um aerogerador de pequeno porte com segurança inerente para aplicação urbana. Para isso foi avaliado o potencial eólico com a comparação das distribuições em Weibull e Gama. O projeto consiste em uma turbina eólica de eixo horizontal com cinco pás acoplada ao gerador eólico, sendo este um gerador de ímãs permanentes, que constituem as partes ativas do gerador elétrico projetado. Foi acoplado também um difusor com o objetivo de canalizar o vento e aumentar a produtividade do rotor, que de acordo com os estudos realizados, pode aumentar a velocidade do vento no rotor em aproximadamente 60 %. Também foram apresentadas simulações computacionais e, por fim, com as soluções adotadas, foi proposto este modelo de aerogerado para a aplicação urbana.

Já uma aplicação rural de turbinas eólicas de pequeno porte foi realizada por Albiero *et al*, (2014), no estado do Ceará. O objetivo era aproveitar o potencial eólico da região semiárida e auxiliar na disponibilidade de energia elétrica para a agricultura familiar. Com isso, foi criada uma turbina eólica de pequeno porte, com coeficiente de potência (CP) de 0,31, que funciona com baixa velocidade do vento. Para o seu funcionamento com velocidade de vento de $3,45\text{m}^2$ foi implementado um TARP (*Toroidal Accelerator Rotor Platform*), que de acordo com Weisbrich; Rainey (1977) apud Albiero *et al* (2014) aumenta a velocidade do vento em 180%.

A carenagem do sistema TARP foi projetada para ser coberta por fibras vegetais de carnaúba que possibilitou diversas vantagens. Além disso, foram usadas outras matérias sustentáveis como a prancharia de madeira, bambu e fibras. Finalizando, o uso da turbina com inovações tecnológicas para baixas velocidades de ventos foi capaz de fornecer energia a baixo custo e gerar renda.

Sousa (2014) construiu e testou três rotores eólicos de pequeno porte, onde cada um era constituído de três pás de 2 m de comprimento. O diferencial em cada rotor eólico era a sua geometria construtiva, sendo que, no primeiro não tinha correção, no segundo a correção era nas pás e o terceiro a correção era somente na raiz. Então, o autor realizou testes laboratoriais e de campo que, com dados obtidos submetidos a análise, resultou na constatação de não haver uma diferença significativa entre os desempenhos das pás testadas.

O projeto de iniciação científica de Almiñana e Peneiro (2013) resultou na criação de uma turbina eólica de pequeno porte de baixo custo do tipo Savonius, realizado na CEATEC da PUC-Campinas. O projeto consiste de 20 m de tubo metálico de 17,5 mm de diâmetro, 4 mancais de rolamento com 100 mm de diâmetro externo, 4 tambores plásticos e 3 metálicos

cortados ao meio, eixo metálico com 26,8 mm de diâmetro e 1890 mm de comprimento. Além do alternador, gerador, regulador e as engrenagens.

O projeto se deu da seguinte forma: Seleção do material, construção, testes mecânicos, testes elétricos e computacionais. Foram realizados ensaios empregando sensores de velocidades de rotação, voltagens, correntes e dentre outros, todos com o objetivo de determinar a eficiência da turbina. A partir de métodos computacionais determinou a curva da potência da turbina e, a partir dos testes, mostrou que a turbina eólica teve um desempenho significativo, podendo servir para carregar baterias, por exemplo, com também outras aplicações.

Ensaio realizado em um túnel de vento numa turbina eólica de eixo vertical do tipo H-Darrieus com cinco pás foram feito por Tedesco (2015) a fim de aperfeiçoar e comparar resultados, como mostra a Figura 17. O dispositivo estudado trata-se de um direcionador de escoamento, o qual baseia seu funcionamento no aumento da velocidade de escoamento do ar incidente na microturbina, com o objetivo de analisar a eficiência das diferentes direções de escoamento. A partir de trabalhos de outros pesquisadores, o autor buscou uma alteração na geometria de um direcionador já desenvolvido por outros pesquisadores com o intuito de obter uma melhor performance para uma turbina integrada ao topo de uma edificação urbana. Os testes foram realizados com o direcionador e sem o direcionador, onde foi constatado que, quando estava sem o direcionador, a turbina necessitava da aplicação de uma rotação para que se iniciasse o movimento, assim, com o direcionador a turbina apresentou melhor eficiência e potência.

Figura 17: Túnel de vento e turbina H-Darrieus com 5 pás



Fonte: Adaptado de Tedesco (2015)

Com o intuito de avaliar se uma turbina do tipo Savonius, de eixo vertical, é uma opção viável para aplicação em diferentes regiões do Brasil, em diferentes velocidades de vento, Cardoso e Ferreira (2015) apresentou algumas equações matemáticas e conceitos fictícios que comprovasse o desejado.

As cidades analisadas foram: Florianópolis, Natal, Goiânia, Manaus e Sorocaba. Então, a partir dos cálculos matemáticos foram obtidos às potências elétricas e os gráficos correspondentes para cada uma das cidades. Com isso, os autores constataram que as cidades que não pertencem à costa litorânea não são viáveis a aplicação desta turbina e as cidades que pertencem à costa litorânea são viáveis sua aplicação.

Simonsen (2009), a partir de resultados experimentais, afirma que para obter uma máxima eficiência com a turbina de eixo horizontal o coeficiente de potência deve estar normalmente compreendido entre 0,4 e 0,5, e com a turbina Darrieus o coeficiente de potência seria na ordem de 0,4.

Assis (2015) descreveu um novo modelo de turbina residencial com aprimoramento na sua torre, por perceber que a mesma estava submetida a esforços os quais influenciavam em seu rendimento. Seguindo o mesmo contexto, com a busca de aperfeiçoar, Tedesco (2015) propôs um dispositivo direcionador de escoamento que baseia seu funcionamento no aumento da velocidade de escoamento.

Este trabalho tem como proposta o desenvolvimento de um aplicativo de simulação na área de energia eólica de pequeno porte. Pires e Oliveira (2017) focaram, principalmente no desenvolvimento e na implementação de um sistema de informação que divulga os benefícios que a geração distribuída de energia elétrica proporciona ao usuário, além de dimensionar o sistema eólico, indicando qual sistema será necessário para suprir a necessidade de uma residência.

Desta forma, o usuário fica informado sobre diversos fatores referentes a este tema. Criado o aplicativo web e posto em desenvolvimento concluíram, já nas as primeiras fases de teste, dos os usuários que realizaram simulação, obteve-se informações suficientes para considerar investirem em geração de energia eólica de pequeno porte.

Em resumo, pode-se ver que o estado da arte atual apresenta ideias que geraram resultados satisfatórios, tanto no tocante a implementação de suas pesquisas, quanto ao fornecimento de dados que robustecem a linha do presente estudo, objetivando a viabilidade

de sistema eólico residencial e identificação de qual topologia utilizar, sendo interessante uma síntese das principais características desse estado.

Tabela 3: Resumo da Revisão bibliográfica

REFERÊNCIA	Eixo	ÁREA DO ROTOR (M²)	(CP)	POTÊNCIA (W)	RENDIMENTO (%)
Argentino (2007)	Horiz	0.79	-	31,04	-
Almeida et al. (2008)	-	1,04	-	400	-
Junior (2008)	Horiz	-	-	5000	-
Albie ro et al. (2009)	Horiz	10,2	0,31	-	-
Tibola G. (2009)	Horiz	-	-	500	-
Simonsen (2009)	Horiz	0,28	0,35	13,09	-
	Vertical	0,3	0,089	2,75	-
Almeida e Silva (2011)	Horiz	1,10	-	200	-
Carmo (2012)	Vertical	6	0,3	1600	30
Verdum (2013)	Horiz	-	-	-	-
Almiñana e Peneiro (2013)	Vertical	-	-	49	-
Sousa (2014)	-	3,14	0,47	-	-
Tedesco (2015)	Vertical	-	-	-	-
Cardoso e Ferreira (2015)	Vertical	-	-	-	-

3. ANÁLISE DAS TOPOLOGIAS DE TURBINAS EÓLICAS PARA APLICAÇÃO NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

Dentre as topologias de turbinas estudadas pelos diversos autores mencionados no capítulo anterior, neste capítulo, quatro serão aplicadas no semiárido potiguar com o objetivo de encontrar a topologia que melhor se adapte às condições locais dados o potencial eólico da região.

3.1 Turbinas Eólicas de Pequeno Porte

As topologias de turbinas diferenciam-se, além de outros fatores, principalmente pelo seu eixo de rotação: horizontal ou vertical. De acordo com Carmo (2012), nas turbinas de eixo horizontal o eixo de rotação é perpendicular à torre e as pás devem sempre ser orientadas segundo a direção do vento. Já as de eixo vertical possuem o eixo de rotação orientado na mesma direção da torre, que seria na direção perpendicular à direção do movimento do vento, e por esse motivo não necessitam de ser orientadas na direção do vento.

Cada topologia de turbinas comporta-se em meio ao fluido (massas de ar) com características particulares impulsionadas tanto por força de arrasto como por força de sustentação, e também estando sob forças de empuxo, toque e centrífuga, esta última sendo uma carga estática perpendicular ao eixo de rotação, que influenciam direta ou indiretamente na potência elétrica gerada (JUNIOR, 2008).

Independente da turbina ser de eixo horizontal ou vertical, a potência será igual ao trabalho dividido pela variação de tempo. Por tratar-se de massas de ar e encontrar-se em movimento, o trabalho realizado será definido pela energia cinética, uma vez que não há variação de pressão nem variação de altitude. Logo, a potência será definida, de acordo com Simonsen (2009), por:

$$P = \frac{m v^2}{2\Delta t} \quad (1)$$

A razão entre a massa e a variação do tempo define a vazão da massa de ar, ou seja, é o fluxo de massas de ar que passará perpendicularmente a uma seção transversal de área, Figura 18, barrida pelas pás das turbinas, que de acordo com Simonsen (2009), é descrita pela seguinte equação,

$$\dot{m} = Q = \rho VA \quad (2)$$

Substituindo a Equação (2) na Equação (1), conclui-se que potência elétrica gerada por uma turbina, de acordo com Simonsen (2009), é dada pela seguinte equação:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3)$$

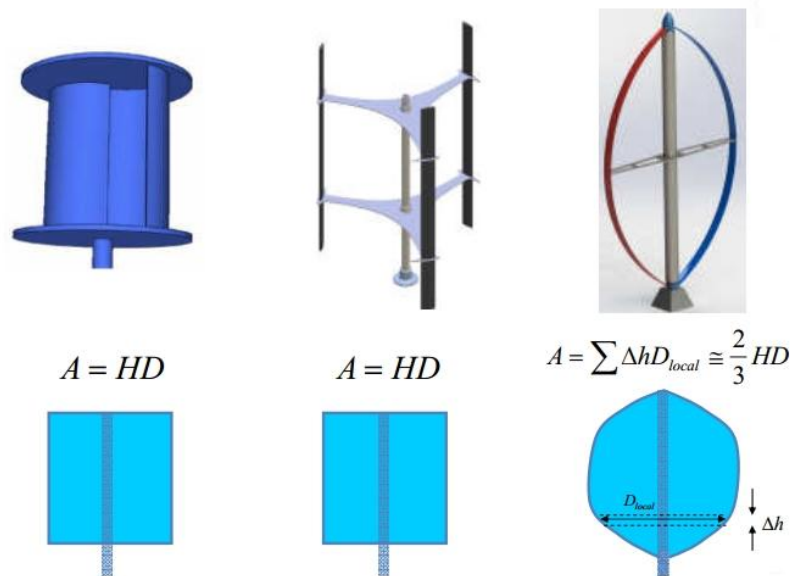
onde C_p é o coeficiente de potência da turbina, λ (TSR) é o coeficiente de velocidade de ponta, β (pitch) é o ângulo de passo das pás, A é a área varrida pelas pás da turbina [m^2], ρ é a densidade do ar [Kg/m^3] e v é a velocidade do vento incidente na aerogerador [m/s] (CRESESB, 2008).

O coeficiente de velocidade de ponta (λ) é dado pela razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente. A seguir:

$$\lambda = \frac{R_v}{V} \quad (4)$$

na qual V é a velocidade rotacional da turbina eólica.

Figura 18: Áreas Barridas



Fonte: Adaptador de PUCRS (2012)

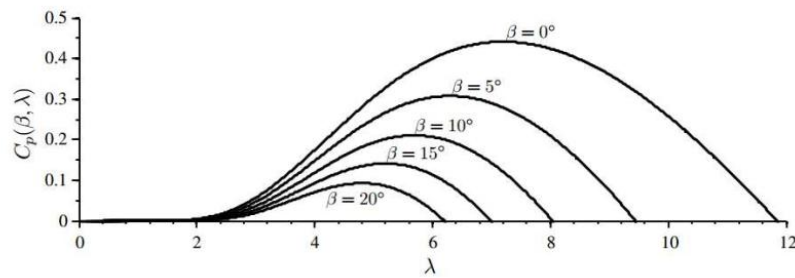
As massas de ar quando incididas na turbina irão possuir uma velocidade diferente a montante e a jusante das pás, no que se refere a uma perda de energia no decorrer do processo de conversão da energia cinética para energia mecânica. Por esse motivo a potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador (Simonsen 2009).

Dessa forma, o coeficiente de potência (C_p) irá corrigir a potência indicando o rendimento máximo ideal. Através de experimentos, o físico alemão Albert Betz definiu esse coeficiente como sendo a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor:

$$C_p = \frac{16}{27} = 59,3 \% \quad (5)$$

Portanto, a potência extraída do vento que é transformada em mecânica no rotor não pode ser superior à porcentagem mencionada (CRESEB, 2008). Na Figura 19, apresenta-se a relação entre o coeficiente de potência e o λ para um determinado β .

Figura 19: Coeficiente de potência em função do λ e do β



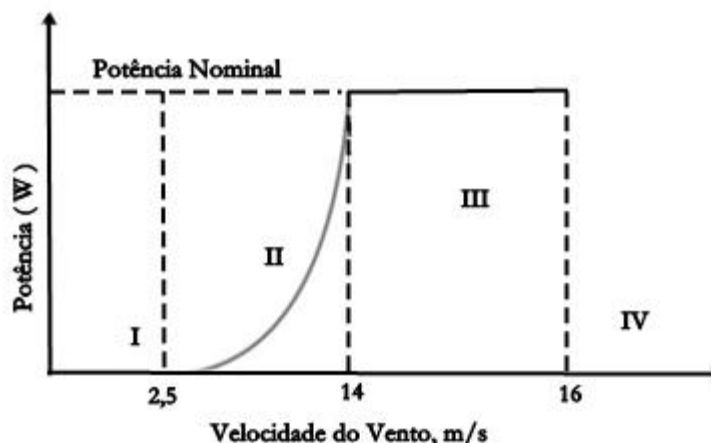
Fonte: ARRAIS, 2014, p.12

Assim, substituindo equação (6) em (3) temos que a fórmula final para calcular a potência da turbina eólica é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \eta \cdot A \cdot v^3 \quad (7)$$

A potência da turbina está relacionada com a velocidade do vento, e para que a turbina inicie o processo de rotação é necessário um torque mínimo de partida, ou seja, há uma velocidade mínima do vento para que o rotor gire e comece a gerar energia. O torque é dito baixo quando é necessária uma velocidade baixa do vento para fazer o rotor girar e é dito alto quando é necessária uma alta velocidade de vento para fazer o rotor girar.

Figura 20: Curva da Potência em função da velocidade do vento



Fonte: Adaptado de Arrais, 2014, p.13

Portanto, na Figura 20 está representada a curva da potência em função da velocidade do vento, e considerando o máximo aproveitamento da energia do vento disponível, de acordo com Arrais (2014), as áreas estão determinando o limite de funcionamento da turbina.

- A região I especifica a velocidade mínima necessária do vento para a microturbina começar a gerar;
- A região II é a região na qual se pode obter a máxima eficiência do rotor;
- A Região III é a região de limitação de potência, que é utilizada para limitar a potência de saída no valor nominal da turbina eólica, mantendo a integridade física da turbina;
- A Região IV é quando é interrompida a operação da turbina, a fim de evitar danos ao sistema.

O torque mínimo pode ser definido de acordo com as características de fabricação da turbina, como por exemplo, o material de fabricação das pás quanto mais leve menor será o torque necessário para dar partida, o inverso também é válido. Outro fator que torna o torque alto é o desalinhamento dos eixos (ALMEIDA e SILVA, 2011).

A partir da potência do vento, é escolhida a turbina que atenda à necessidade energética da residência, na medida certa, gerando energia suficiente para o consumo. De acordo com o Instituto Ideal (2014), as turbinas eólicas de pequeno porte que possuem características de maior aproveitamento são: as de Rotor horizontal, Savonius, Darrieus e H-Darrieus.

3.2 Cálculo da Potência

Para o cálculo da potência de uma turbina eólica de pequeno porte devem-se considerar dois fatores que variam de região para região: velocidade do vento e densidade relativa do ar. Na região semiárida potiguar, tomando como base a cidade de Pau dos Ferros, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, a velocidade do vento está com média anual de 3,93 m/s. O outro fator determinante é a densidade relativa do ar que para casos práticos, de acordo com Sousa (2014), é de 1,225 kg/m³.

Vale salientar que a potência da turbina está relacionada com a sua forma construtiva. A mesma é formada por um rotor que pode ser composto de duas, três ou mais pás. O rotor é responsável por capturar a energia eólica, e transmitir a força mecânica dos ventos para o gerador finalizar gerando a energia elétrica (INSTITUTO IDEAL, 2014). Como já foi estudado o comportamento dos ventos no Capítulo 1, neste capítulo será utilizado apenas para o cálculo da potência das topologias a seguir.

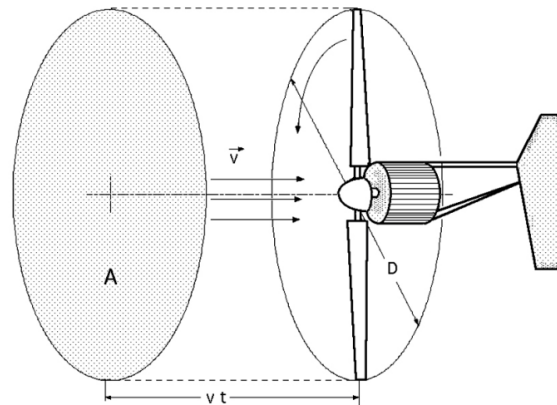
3.2.1 Rotor Horizontal

Embora a tecnologia de turbinas de eixo horizontal esteja mais consolidada para instalações de potência elevada, de acordo com o Instituto Ideal (2014), as microturbinas são comumente utilizadas em sistema eólico residencial, e apresentam as seguintes características:

- Não possui sistema de controle das pás ou eixo interno;
- Pode ser mais ruidoso do que as outras topologias;
- Inadequado para locais com ventos turbulentos;
- Giram pela predominância de forças de sustentação.

Os seus componentes são semelhantes às de grande porte, em escala reduzida, que são as pás, a nacelle, e a torre (BENITO, 2012). Na Figura 21 está representada a área de varredura da microturbina, que para o cálculo da potência é essencial.

Figura 21: Área A varrida pelo rotor de diâmetro D



Fonte: JUNIOR, 2008, p.49

Como a área varrida pelas pás é no formato de um círculo, como mostra a figura acima, de acordo com Junior (2008), para o cálculo da potência é usado a seguinte fórmula:

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

onde D é o diâmetro do rotor. Essa topologia necessita de um mecanismo de direção do vento, por esse motivo é instalado um leme, ou comumente chamado por veleta, para a orientação do rotor na direção do vento (SOUSA, 2014). A seguir, a fórmula para o cálculo da área do leme:

$$A_{leme} = 0,04 \cdot A_v$$

onde A_v é a área varrida pelo rotor.

Sabendo da área varrida pelo rotor, da velocidade média anual do vento, da densidade relativa do ar e do coeficiente de potência, calcula-se a potência da turbina de eixo horizontal que possui as seguintes características:

- Potência nominal: 1000 W
- Velocidade do vento de partida: 2,0 m/s
- Diâmetro das Pás: 2,46 m
- Coeficiente de potência: 0,48

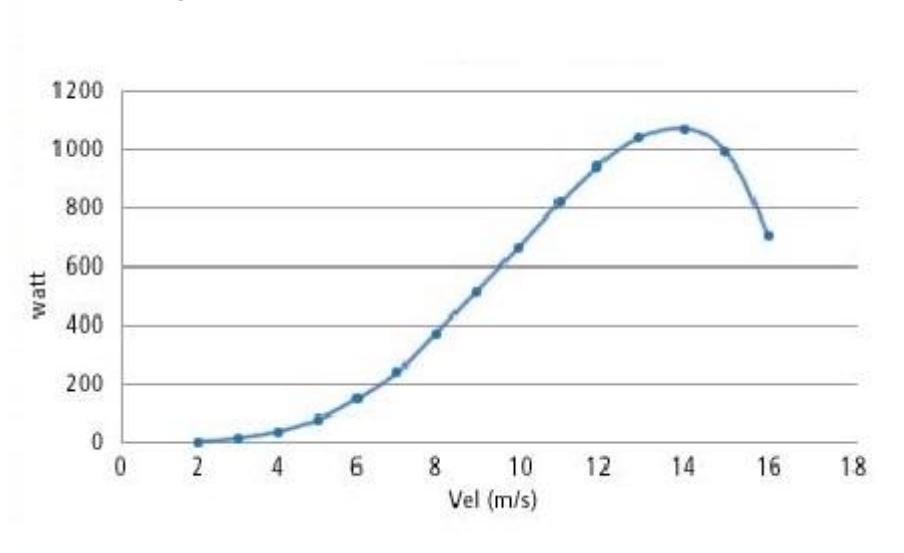
Substituído os referidos valores na Equação (8), temos que

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 4,75 \cdot 0,48 \cdot 3,93^3$$

$$\Rightarrow P = 84,77 \text{ W}$$

A curva de potência da turbina para diferentes velocidades de ventos está representada a seguir.

Figura 22: Curva de Potência da Turbina de Eixo Horizontal



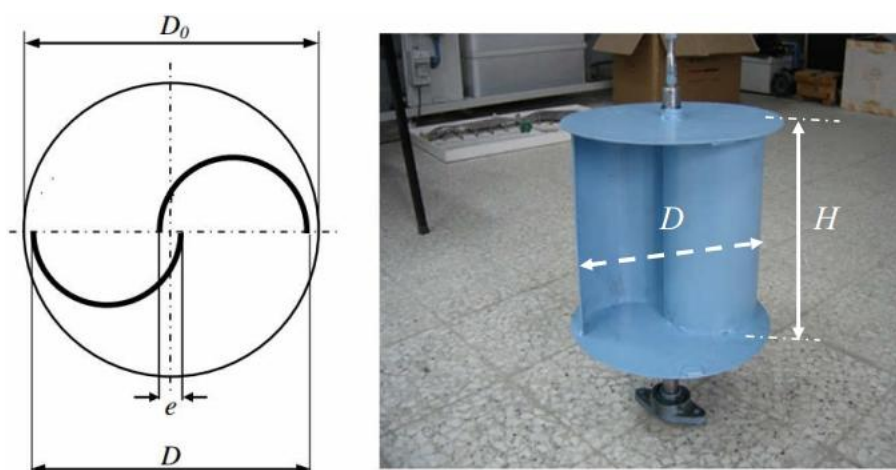
Fonte: Adaptada de ENERSUD, 2017

3.2.2 Rotor Savonius

A turbina Savonius é uma das topologias de eixo vertical, formado por duas ou mais pás no formato de conchas, que aproveita a força de arrasto como força motriz para o seu rotor. Essa topologia pode ser feita também com conchas torcidas, tornando o projeto um pouco mais complexo do que o das turbinas normais, porém considera-se a resistência estrutural do rotor mais elevada (CARMO, 2012). Na Figura 23 está representada a turbina Savonius, que de modo geral apresentam as seguintes características:

- Rendimento energético baixo (Potência baixa);
- A fabricação dessa topologia é mais econômica se comparada com as demais;
- Suporta melhor os ventos mais turbulentos;
- Está normalmente sujeita à grandes variações de binário durante cada período de rotação, o que pode provocar esforços de fadiga no eixo do rotor;

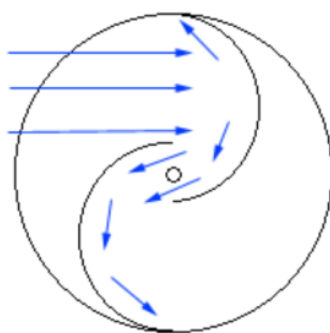
Figura 23: Representação da área para cálculo da potência



Fonte: PUCRS, 2012

De acordo com Cardoso e Ferreira (2015), a potência do vento é extraída pela turbina a partir das diferenças da força de arrasto entre as faces côncavas e convexas dos semicilindros, que se originam em um momento de força fazendo o rotor girar. Na Figura 24 está representado o comportamento do vento das pás de uma Turbina Savonius.

Figura 24: Comportamento do vento nas faces da Turbina Savonius



Fonte: Cardoso e Ferreira, 2015

A potência da turbina Savonius está relacionada diretamente com a sua área, sendo ela no formato de um retângulo, como mostra a Figura 18, será calculada pela seguinte fórmula:

$$A = D \cdot H$$

onde D é a base e H é altura. A turbina utilizada no mercado será a usada para essa análise onde o C_p é igual a 0,31 referente ao estudo realizados por Simonsen (2009) para essa topologia.

Dada a complexidade da dinâmica do escoamento do ar nessa turbina, o estudo teórico limitou-se apenas ao cálculo da potência de forma simplificada, utilizando apenas a velocidade do vento (3,93 m/s), a área varrida e o coeficiente de potência expressos a seguir:

- Velocidade do vento de partida: 3 m/s
- Área varrida: 3 m²
- Coeficiente de potência: 0,31

Substituído os valores na Equação (8), temos que a potência será:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 3 \cdot 0,31 \cdot 3,93^3$$

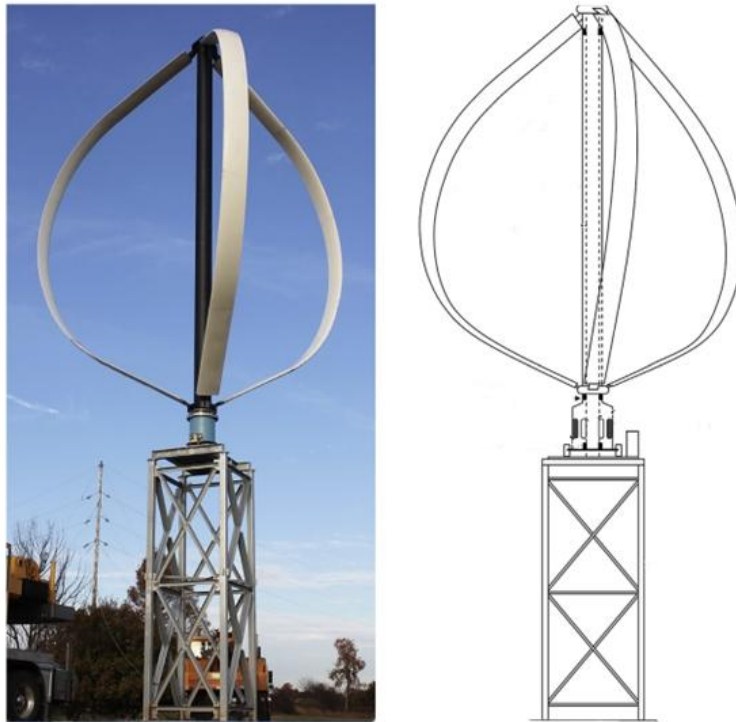
$$\Rightarrow P = 34,57 \text{ W}$$

3.2.3 Rotor Darrieus

A turbina Darrieus é uma das topologias de eixo vertical que possuem duas ou três pás curvadas (helicoidal) atadas pelas duas pontas ao eixo vertical, onde a força motriz é a força de sustentação aerodinâmica que se exerce sobre as pás. Além do formato convencional, a Darrieus também é apresentada no formato com pás torcidas que, assim como a Savonius, possui elevada resistência estrutural do rotor (CARMO, 2012). Apresentam as seguintes características:

- Possui resistência estrutural do rotor, portando os esforços estruturais podem ser muito elevados, principalmente devido aos carregamentos cíclicos nas pás;
- Necessitam de um motor de partida, pois apresentam deficiência na partida de funcionamento;
- Muitos dos modelos são ruidosos, e geralmente é mais caro que os outros tipos.

Figura 25: Ilustração da turbina Darrieus



Fonte: Adaptado de TJIU *et al.*, 2015

Diferente das demais topologias de turbinas, essa a área varrida possui o formato de uma elipse, como mostra a Figura 18, e de acordo com Simonsen (2009), a partir de resultados experimentais, o coeficiente de potência é da ordem de 0,4. Será utilizada para os cálculos a seguir a turbina que possui as seguintes características – valores médios de mercado:

- Potência nominal: 1000 W
- Velocidade do vento de partida: 3 m/s
- Diâmetro das Pás: 2,5 m
- Altura das pás: 2 m
- Coeficiente de potência: 0,40

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 3,33 \cdot 0,4 \cdot 3,93^3$$

$$\Rightarrow P = 49,57 \text{ W}$$

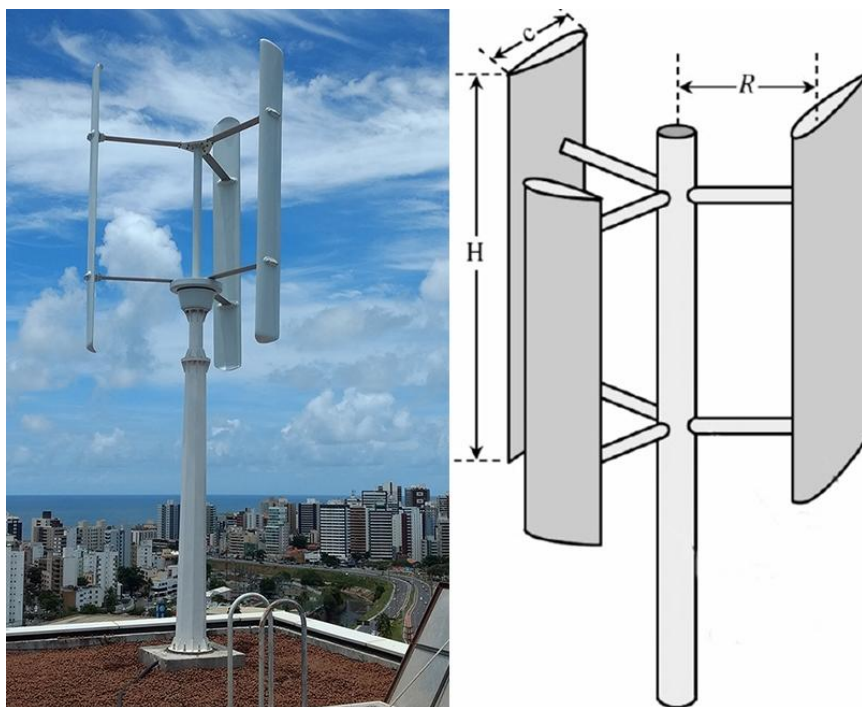
3.2.4 Rotor H-Darrieus

A turbina H-Darrieus também é uma das topologias de eixo vertical e possui suas pás verticais posicionadas em paralelo. Por conta da sua geometria a cada posição que a pá se posiciona enxerga a chegada do vento de uma forma diferente e apresenta um rendimento energético ligeiramente superior ao da turbina Darrieus de pás curvas, devido sua área de passagem de escoamento ser maior (CARMO, 2012).

Nessa topologia as pás apresentam um formato simétrico, criando sustentação independente da direção do vento. Além desta característica, outras podem ser citadas como:

- Os esforços estruturais a que estas turbinas estão sujeitas são mais elevados;
- Mais silencioso se comparado as demais topologias de turbinas;
- Mais eficiente que o tipo Darrieus;
- Modelos com motores sem núcleo não precisam de sistema de aceleração inicial.

Figura 26: Ilustração da turbina H-Darrieus



Fonte: Autoria própria

Na Figura acima está representada uma visão frontal da turbina Darrieus, sendo H a altura da pá e R o raio. Já na Figura 18 foi representada a área varrida pela turbina que será utilizada no cálculo da potência a seguir. Apesar deste tipo de turbina apresentar uma maior complexidade, seja no modelo matemático como no design, de acordo alguns testes realizados por Simonsen (2009) o coeficiente de potência encontrado foi de 0,4.

Será utilizada para os cálculos a seguir a turbina também utilizada no mercado que possui as seguintes características:

- Potência nominal: 1500 w
- Velocidade do vento de partida: 2,5 m/s
- Diâmetro das hélice: 2 m
- Altura das pás: 2,66 m
- Coeficiente de potência: 0,40

Calculando a área varrida temos que

$$A = D \cdot H$$

$$\Rightarrow A = 2 \cdot 2,66$$

$$\Rightarrow A = 5,32 \text{ m}^2$$

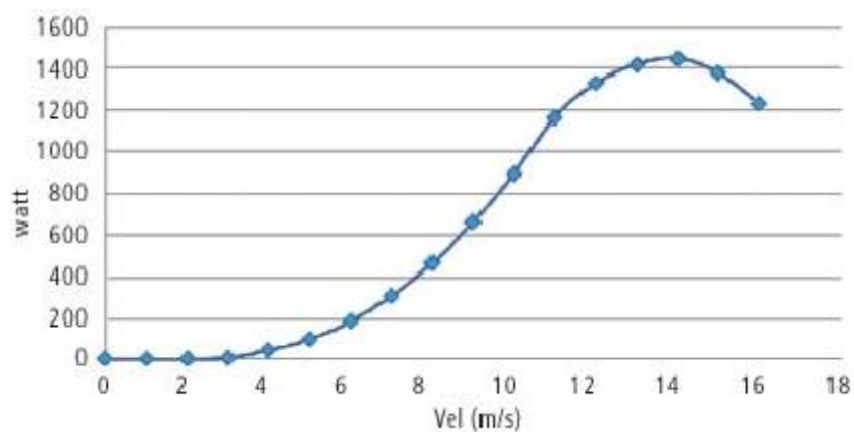
E a potência será,

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 5,32 \cdot 0,4 \cdot 3,93^3$$

$$\Rightarrow P = 79,11 \text{ W}$$

A curva de potência da turbina H-Darrieus para diferentes velocidades de ventos está representada a seguir.

Figura 27: Curva de Potência da Turbina H-Darrieus



Fonte: Adaptada de ENERSUD, 2017

3.3 Geradores Eólicos de Pequeno Porte

Os geradores de pequeno porte, conhecidos como minigeradores e microgeradores, nas topologias de eixo horizontal estão acoplados na turbina e nas topologias de eixo vertical está acoplado na torre ou sobreposto na superfície. São os responsáveis por converter a energia mecânica, de rotação do eixo do rotor, em energia elétrica.

De acordo com Adegas (2012), analisando os geradores em sistemas isolados, tem-se que os Geradores de corrente alternada trifásicos de ímas permanentes (GSIP) são os mais utilizados na atualidade. Em segundo lugar são os Geradores de indução que aparecem bem distantes na colocação.

O mesmo reforça que os GSIPs, quando projetados adequadamente, possuem uma boa eficiência, não necessitam de fonte externa, com elevado número de polos, possui um eficiente desempenho em baixas rotações, favorecendo a diminuição de ruído aerodinâmico e produzindo tensão e frequência variáveis com sua rotação.

A rotação do eixo de uma turbina eólica de pequeno porte varia de acordo com o diâmetro das pás do rotor. Para a estimativa da rotação nominal de operação (RPM) é usada a fórmula prática descrita abaixo.

$$RPM = \frac{1123}{D}$$

onde D é o diâmetro do rotor, e o RPM é dado em rotações por minuto. À medida que a tecnologia propicia dimensões menores para as turbinas, a rotação aumenta (MARQUES *et al.*, 2012).

Na Tabela 4 estão os resultado dos cálculos da Rotação Nominal para as topologias de turbinas eólicas analisadas nesta seção.

Tabela 4: Rotação Nominal de turbinas eólicas de pequeno porte

Topologia	RPM
Eixo Horizontal	456,5
Savonius	561,5
Darrieus	449,2
H-Darrieus	422,18

Fonte: Autoria própria

3.4 Resumo

No tocante ao potencial, o presente capítulo cumpriu seu papel no que diz respeito ao sistema residencial, pois foram analisadas as turbinas e então verificada as de maior potência.

Na análise das microturbinas para aplicação no semiárido potiguar, levou-se em consideração a velocidade média anual dos ventos na cidade de Pau dos Ferros.

Tomou-se como base as turbinas mais utilizadas no mercado, com características semelhantes. A variação de uma para a outra foi somente devido a seu processo de fabricação e funcionamento. Foram considerados para o cálculo da potência de cada topologia os valores aproximados do diâmetro, da potência nominal e da velocidade de partida. Já o coeficiente de potência variou de acordo com cada topologia. Vale salientar que os valores utilizados foram dados na ficha técnica da mesma. Com base nesses dados calculou-se a potência, exposta na Tabela 5.

A turbina Darrieus, além da potência gerada ser baixa, apresenta deficiência na partida de funcionamento sendo necessário um motor de partida, assim inviabilizando a sua utilização. Já a turbina Savonius apesar de possuir um baixo torque de partida, apresenta-se com baixo rendimento devido seu coeficiente de potência não sendo viável também a sua utilização.

No mercado já se encontra a junção da topologia Darrieus com a Savonius, a segunda assumindo a função de motor de partida para o sistema devido sua facilidade de vencer a inércia de repouso. Porém ainda assim a potência gerada não é suficiente para viabilizar a sua utilização.

A turbina H-Darrieus apresenta-se mais eficiente que a Darrieus, e não precisa de um sistema inicial de aceleração. O seu cálculo de potência, como mostra na Tabela 5, viabiliza sua instalação devido ter sido relativamente alto, quando comparados às demais topologias, porém com potência um pouco inferior a turbina de eixo horizontal.

Por fim, a turbina de Eixo Horizontal, entre as demais topologia foi a que apresentou maior potência. Vale salientar que apesar de não serem indicadas para ventos turbulentos, essa topologia geralmente possui uma maior eficiência devido ser mais comum no mercado e estar sendo desenvolvida tecnologias que viabiliza a sua utilização.

Restando abordar ainda o preço, mesmo concordando com Kennedy (2005), já que quantificar o valor de energia eólica é muito mais difícil do que calcular o seu custo, porque a operação de todo o sistema de energia deve ser incorporada às análises. Assim, levando-se em consideração o sistema eólico de pequeno porte, e procurando quantificar esse custo, ver-se que o preço da energia eólica está sendo basicamente: os custos com equipamentos e a manutenção, daí a importância de reunir as características dessas topologias para determinar qual, H-Darrieus ou a de Eixo Horizontal, é mais eficiente para a região do Semiárido. Discutida na próxima seção.

Tabela 5: Resumo das topologias analisadas.

Topologia de Turbina	Diâmetro (m)	Potência (W)	RPM
Eixo Horizontal	2,46	84,77	456,5
Savonius	2,0	34,57	561,5
Darrieus	2,5	49,57	449,2
H-Darrieus	2,66	79,11	422,18

Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentada a análise de viabilidade do uso das turbinas H-Darrieus e de Eixo Horizontal, pois dentre vários fatores, como discutido anteriormente, a potência das mesmas foram o diferencial em relação às demais. Assim, a fim de determinar qual é mais eficiente para aplicação residencial, escolheu-se uma residência na cidade de Pau dos Ferros e fez-se o estudo do local.

Levando-se em consideração a variação dos ventos diário e mensal do local, a partir do equacionamento descrito na seção anterior, será calculada a potência total de cada turbina. E por fim será apresentado o processo de instalação do sistema eólico residencial, analisando todos os fatores, como por exemplo, se o sistema é conectado a rede ou não e o seu custo. O objetivo é apresentar os resultados da turbina com melhor eficiência e custo benefício para aplicação residencial no Semiárido Potiguar.

4.1 Locais de instalação

A viabilidade da instalação do sistema eólico estar relacionada com a energia gerada pela turbina a partir da velocidade do vento local. As turbinas eólicas residenciais estão mais próximas do solo, quando comparadas com os grandes aerogeradores, por esse motivo será estudado o terreno e o entorno da edificação a fim de definir se o local é indicado para a instalação.

As aplicações dos modelos serão feitos em uma residência localizada na Rua José Alves de Queiroz na cidade de Pau dos Ferros, visualizada no ponto “A” da Figura 28. Situada na Região do Semiárido Potiguar, com Latitude $6^{\circ}07'22.80''S$ e Longitude $38^{\circ}12'24.13''O$ (Figura 29).

A edificação consta com dois pavimentos, ficando a uma altura de aproximadamente 12 m referente ao nível do solo. Na lateral esquerda da edificação consta um terreno vazio, e a edificação mais próxima está a uma distância de aproximadamente 200 m. Já na lateral direita as edificações não ultrapassam 10 m, o que influencia positivamente na instalação da turbina por permitir a livre passagem do vento.

Para determinar a posição que a turbina deve estar direcionada é analisado a rosa dos ventos para a cidade de Pau dos Ferros que mostra quantas horas por ano o vento sopra na direção indicada. Portanto, de acordo com a Figura 30 a direção que recebe maior quantidade de ventos é a direção ESE, o vento sopra entre 0,3 a 8 m/s variando o horário entre 79 h/ano e 750 h/ano.

Figura 30: Rosa dos Ventos da Cidade de Pau dos Ferros

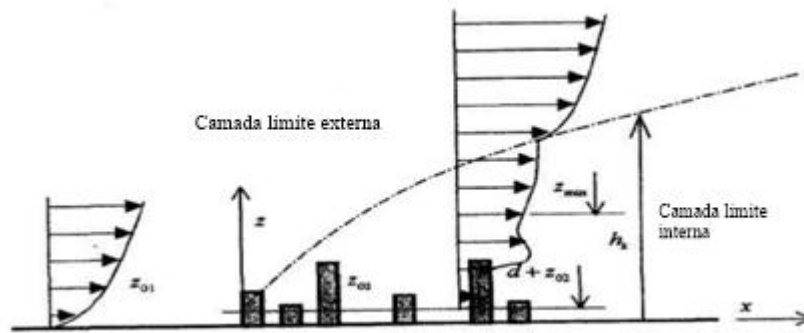


Fonte: Meteoblue

A velocidade do vento vai desacelerando na medida em que vai se aproximando do solo, isso se dar pelo fato de que a estrutura do vento varia de acordo com as características do terreno e com a rugosidade da superfície terrestre o que determina a constituição da camada limite da atmosfera (MATTUELLA, 2012).

O modelo de camada limite urbana apresentado a seguir serve apenas para definir um valor adequado para a altura da torre da turbina eólica. Assim, para determinar a altura da torre da turbina, leva-se em consideração tal modelo. Além disso, é analisado o perfil de velocidade do vento de acordo com a Figura 31, obtendo que a altura da torre será igual à cota mínima menos a altura do edifício onde a mesma será instalada.

Figura 31: Perfil de velocidades do vento no exterior e no interior de uma urbanização



Fonte: Carmo, 2012

A partir de uma determinada cota a contar do solo, calculado em função da altura de deslocamento (d), será obtido o perfil de velocidade do vento. Como se trata de ambientes urbanos será válida apenas para alturas superiores a uma cota mínima calculada na equação 4.1.

$$Z_{min} = 1,2 \cdot d, \quad (4.1)$$

onde d é altura de deslocamento. Para determinar essa altura, tem-se

$$d = \bar{H} - 4,3 \cdot z_0(1 - A_H),$$

sendo $\bar{H}$ a altura média dos edifícios da cidade de Pau dos Ferros, A_H a porcentagem de área da cidade ocupada por edifícios e z_0 a altura da rugosidade do terreno. Também para determinar a altura da rugosidade do terreno faz-se,

$$z_0 = 0,08 \cdot A_H \cdot \bar{H}$$

Sabendo disso, considerando um valor de 15 metros para $\bar{H}$ e 20% para A_H , o valor da cota mínima será aproximadamente 17 metros. A residência de instalação têm 2 andares, o que faz uma altura de aproximadamente 12 metros. Desta forma, o valor estipulado para a altura da torre neste projeto é de 5 metros. Vale ressaltar que a altura da torre é projetada de maneira a evitar que o rotor esteja sujeito à separação do ar, ocorre muitas vezes ao nível do telhado.

4.2 Turbina Eólica: H-Darrieus e Eixo Horizontal

A partir do modelo matemático usado no capítulo 3 para calcular a potência das turbinas, dentre as topologias analisadas, foi escolhido a topologia H-Darrieus e a de eixo horizontal, especificadas na Tabela 6, por apresentarem o melhor desempenho. Diante disso,

será calculado a potência de ambas as turbinas considerando a velocidade do vento mensal, subdivido em períodos, e diária.

Tabela 6: Características das turbinas analisadas

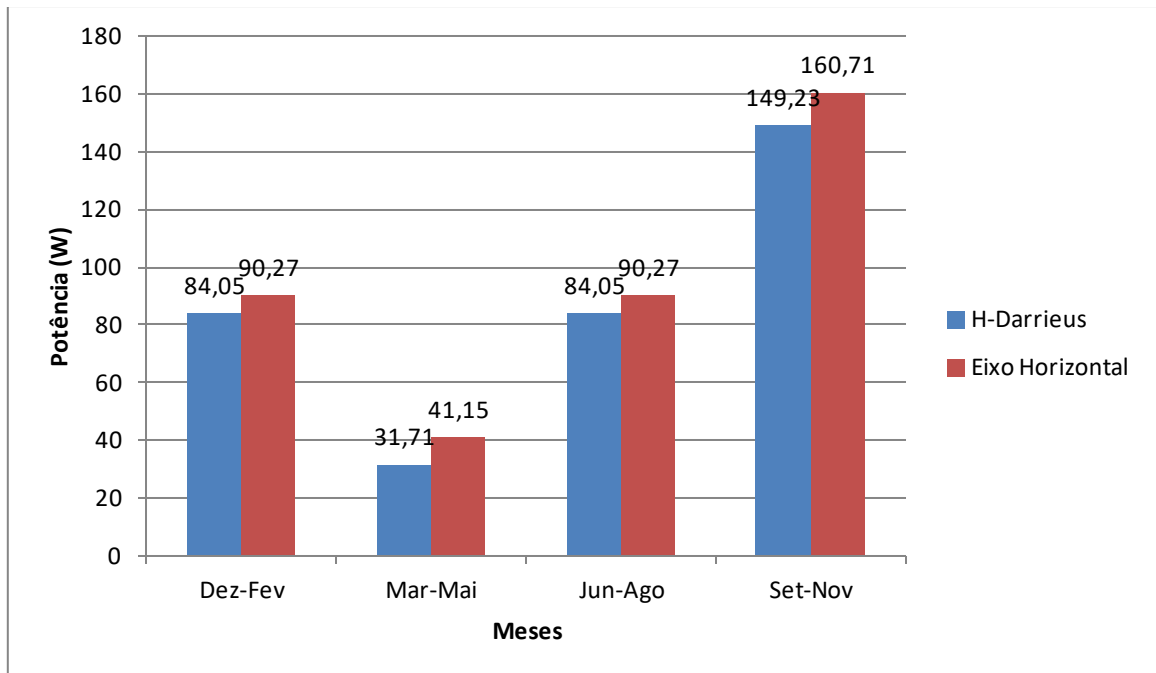
	H-Darrieus	Eixo Horizontal
Diâmetro da hélice	2,0 m	2,46 m
Altura das pás	2,66 m	-
Número de pás	3	3
Material das Pás	Compósito de Fibra de Vidro	Fibra de Vidro Reforçado
Potência Nominal	1500 W	1000 W
Rotação Nominal a 12m/s	180 RPM	740 RPM
Torque de partida	0,3 Nm	0,3 Nm
Tensão de saída	24/48/220/400 volts	24/48/220/400 volts
Velocidade Nominal	12,5 m/s	7 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s	2,0 m/s
Velocidade Máxima	137 km/h	50 km/h
Temperatura de operação	-10 a 50 °C	-
Coefficiente de Potência (C_p)	0,40	0,48

Fonte: Própria Autoria

Os dados das velocidades dos ventos utilizados na pesquisa foram obtidos a partir do levantamento meteorológico da CRESESB referente a uma altura de aproximadamente 50 metros em relação ao nível do mar, e para a uma análise detalhada foi usado o Meteoblue, ambos voltados para a cidade de Pau dos Ferros, nos meses de janeiro a dezembro. Supondo que seria nessas condições o funcionamento da turbina realizando trabalho, considerou-se também que o vento possui sempre direção paralela ao eixo de rotação.

Na Figura 32 está representado o comportamento da turbina H-Darrieus e a de Eixo Horizontal dada às variações da velocidade do vento disponível no atlas do potencial eólico Brasileiro no período de janeiro a dezembro. Foi subdivido as velocidades médias dos ventos referentes a três meses consecutivos e inseridos no eixo horizontal, sendo a primeira coluna a velocidade de 4,01 m/s, seguido de 2,90 m/s, 4,01 m/s e 4,86 m/s.

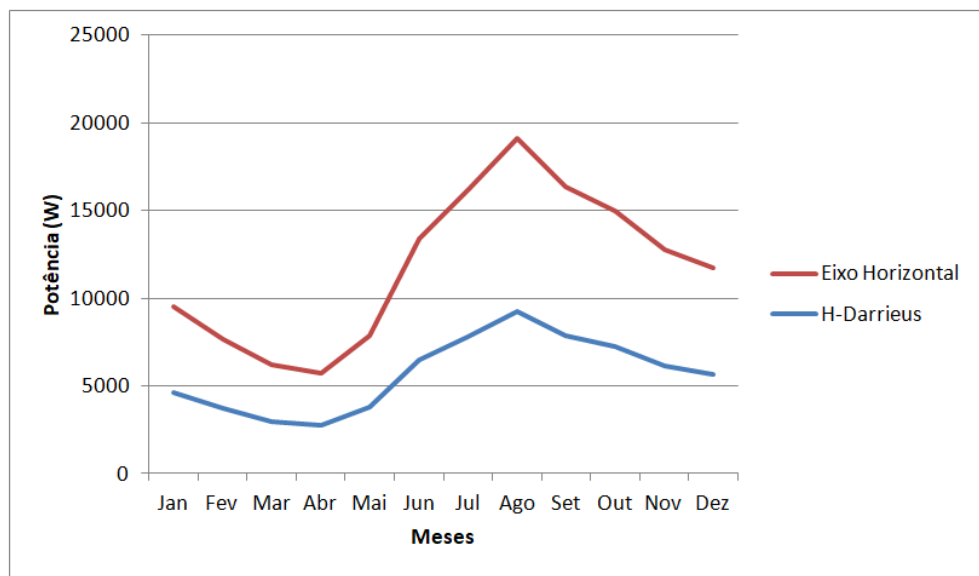
Figura 32: Comportamento da turbina H-Darrieus e a de Eixo Horizontal dada as variações da velocidade do vento



Observe que existe uma variação na velocidade média para cada período mencionado, isso resultará no desempenho da turbina, uma vez que a velocidade do vento é diretamente proporcional a potência gerada pela turbina. Sabe-se que não é viável fazer uma turbina onde as pás se adaptem a cada variação de velocidade, uma vez que irá ter perdas significantes, portando a potência gerada pela turbina será analisada a partir da velocidade média anual, pois o vento não é contínuo e é sazonal.

Para uma análise mais detalhada das turbinas, levando-se em consideração que estas funcionaram todos os dias durante um ano, Figura 33, está descrito a potência total gerada em cada mês de acordo com a variação de velocidade do vento diária. Para isso foi calculado a potência teórica com a velocidade do vento no dia, e a partir de então, a potência mensal que foi o resultado do somatório das potências diárias.

Figura 33: Potência total gerada em cada mês de acordo com a variação de velocidade do vento diária para as turbinas



Sabendo que cada topologia é projetada para uma determinada faixa de variação da velocidade do vento, acima desta faixa, os componentes passam a funcionar com sobrecarga e abaixo da faixa não é viável gerar energia. Em suma, de acordo com a Neoeolica (2011), só podemos retirar no máximo 45 % da potência contida no vento, mas, além disso, tem-se de considerar algumas perdas como aerodinâmicas, elétricas, resistivas e qualidade do vento.

Portanto, fazendo uma análise superficial a partir dos gráficos, verifica-se que a turbina de eixo horizontal está superior a de eixo vertical H-Darrieus, e, contudo fornecerá de forma contínua no máximo 10 % de sua potência nominal, ou seja, em locais com média de vento anual de 3,93 m/s a potência será de 84,77 W.

4.3 Custos (Preço)

Apesar de ainda ser um mercado muito incipiente, tem-se evoluído a participação das Turbinas Eólicas de Pequeno Porte na geração de energia elétrica no Brasil. As fábricas atuantes e especializadas nessa área, de acordo com o centro de energia eólica (PUCRS), estão especificadas na Tabela 7.

O estudo da viabilidade econômica é essencial para toda instalação eólica, e neste caso dependendo da localização e tamanho, algumas das características e custos envolvidos podem ser alterados ou, até mesmo, desconsiderados (REIS, 2014).

O custo da eletricidade tem-se elevado ao longo do tempo, enquanto o valor para instalar sistemas eólicos de pequeno porte faz o caminho inverso, diminuindo anualmente (INSTITUTO IDEAL, 2014). Deste modo, os gastos iniciais poderão ser reduzidos com relação a despesas com avaliação do potencial eólico do local, instalação do microgerador e custos de equipamento.

Tabela 7: Alguns Fabricantes e Representantes de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte

Fabricantes de Turbinas Eólicas		Representantes de Energia Eólica
Eixo Horizontal	Eixo Vertical	
Abundant Renewable Energy	Four Seasons Windpower	ENERSUD
Bergey	Quiet Revolution	Eletrovento
Entegrity Wind Systems	Re-Energy	Altercoop
Proven Energy	Ropatec	EP - Energia Pura Empreendimentos Ltda.
Solar Wind Works	-	Workwind
Southwest Windpower	-	-
Wind Turbine Industries Corp	-	-
Windmission	-	-

Fonte: Centro de Energia Eólica (PUCRS)

Dentre os fabricantes citados, para o preço das turbinas (Tabela 8), tomou-se como referencia uma média de mercado. Vale ressaltar que o preço irá variar de acordo com as características das turbinas e que as informações mencionadas serviram apenas como base para a escolha do aerogerador.

Tabela 8: Preços de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte

Topologia de Turbina	Preço (R\$)
Eixo Horizontal	7.907,00
H-Darrieus	14.000,00

Fonte: Autoria própria

Além da turbina, também é analisado o preço, especificado na Tabela 9 a partir da pesquisa de mercado, dos demais equipamentos necessários na instalação do sistema de geração de energia eólica que são:

- O inversor, responsável por converter a energia em corrente continua produzida pela turbina em corrente alternada direcionando para o uso da mesma;

- O controlador do dispositivo que monitora e controla a rotação e os sistemas de freios além de orientar o aerogerador;
- O medidor bidirecional, responsável por registrar a energia elétrica consumida e a injetada na rede, instalado para o faturamento no ponto de medição;

Tabela 9: Preços dos demais equipamentos do sistema eólico residencial

Equipamentos	Preço (R\$)
Inversor Grid tie 1000 W	1.499,00
Controlador de carga	550,00
Medidor bidirecional	369,00

Fonte: Autoria própria

Outro fator que influencia diretamente no custo é o método de conexão do sistema. Os sistemas eólicos de pequeno porte podem ser conectados a rede de energia, tendo o suporte da concessionária, ou não conectado, sendo necessário um sistema de armazenamento.

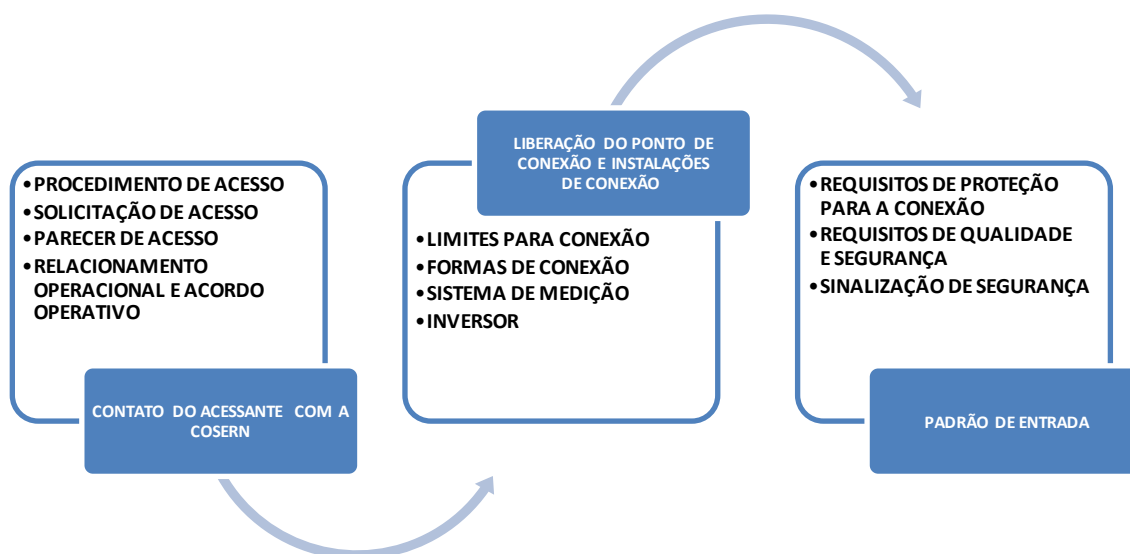
4.4 Sistema Eólico Conectado a rede (sistema *Grid Tie*)

Com a nova regulação da ANEEL, que permite a injeção de energia na rede em troca de créditos em kWh na conta de luz com a distribuidora local, a geração descentralizada de energia tornou-se viável economicamente para consumidores residenciais de quase todo o Brasil. No estado do Rio Grande do Norte a distribuidora COSERN permite a injeção da energia excedente na rede na mesma forma que disponibiliza energia quando o consumo é maior que a produção da energia.

Neste trabalho, como o sistema é direcionado para consumidores de baixa tensão, classificado no Grupo B, o custo de disponibilidade ainda terá de ser pago nos meses em que a geração de energia for igual ou maior que o consumo da rede, mais a incidência de impostos (PIS, COFINS e ICMS) sobre toda a energia consumida.

É responsabilidade do titular da unidade consumidora onde o microgerador estar instalado solicitar a distribuidora local o acesso á rede e é responsabilidade da distribuidora pagar os custos de adequação do sistema de medição, de acordo com a norma da COSERN, conforme Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição, Figura 34, como representado a seguir:

Figura 34: Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição



4.5 Sistema Eólico não conectados à rede elétrica (sistema *Off Grid*): estudo de caso e impactos ambientais

Aqui é indispensável para o projeto um sistema de baterias que armazene a sobra de energia produzida ou também para suprir os picos de demanda de energia da residência. O sistema de armazenamento é dimensionado para atender, considerando as baterias inicialmente carregadas, um consumo diário da residência quando não houver o fornecimento de energia pelo aerogerador.

Existem diferentes modelos de baterias com diferentes preços no mercado, especificamente para esta aplicação, serão utilizadas as baterias estacionárias especificadas na Tabela 10. A quantidade de baterias necessárias para suprir uma residência deve-se levar em consideração a sua demanda, pois a energia armazenada será o resultado da diferença entre a energia gerada e a consumida.

Para este sistema, além das baterias, é necessário também um controlador de carga e descarga onde o mesmo irá gerenciar o fluxo de energia, armazenando a energia excedente ou solicitando a energia armazenada nas baterias, caso a energia gerada pelos microgeradores num determinado instante não seja suficiente para atender ao consumo.

Tabela 10: Preços das Baterias

Baterias Estacionárias	Preço (R\$)
------------------------	-------------

105 Ah	680,00
63 Ah	437,00
45 Ah	355,00

Fonte: Autoria Própria

Dado o consumo da residência, dimensiona-se a quantidade de baterias necessárias para supri-la. Vale salientar que o preço da bateria aumenta proporcionalmente a sua capacidade de armazenamento. Por esse motivo, a depender da demanda de energia da residência, o custo final para geração de energia elétrica torna-se inviável.

Além disso, instalar um sistema eólico de pequeno porte para suas próprias necessidades é uma maneira de garantir que a energia usada é limpa e renovável. Contudo, a ideia de instalar o microgerador sobre o telhado pode emitir ruídos, pois o próprio edifício pode atuar como uma caixa de ressonância (INSTITUTO IDEAL, 2014).

Assim, é necessário verificar se o microgerador não irá fazer barulho ou causar sombreamento que possam incomodar os vizinhos, até por que, como já foi mencionada, a para fixação de torre de sustentação da turbina algumas das vezes é usado cabos de suporte e estes ficando tensionados podem fazer barulho, dependendo da intensidade do vento. Portanto, é importante saber que as escolhas do modelo do microgerador ao analisar o nível de ruído se diferenciam pelas distâncias de 5, 10 e 20 metros e assim por diante (INSTITUTO IDEAL, 2014).

4.6 Resumo

Conhecendo a continuidade e sazonalidade pode-se dizer que não há domínio sobre a ação dos ventos, assim uma média anual é a utilizada para a instalação eólica visto que a periodicidade em meses e anos é mais bem estudada do que em dias e meses. Portanto para determinar a melhor turbina, foi calculada a sua potência a partir dessa velocidade.

A microturbina de Eixo Horizontal apesar de possuir uma potencia nominal (1000 W) menor do que a da microturbina H-Darrieus (1500 W), com a velocidade do vento da cidade de Pau dos Ferros, gerou uma potência maior, com uma diferença na ordem de 15 W. Isso se deu pelo fato de que a sua velocidade de partida também ser menor do que a H-Darrieus. Por esse motivo a microturbina de Eixo Horizontal inicia o processo de rotação do rotor com baixas velocidades de vento.

Outro fator definitivo na potência da turbina estar relacionado ao coeficiente de potência. A turbina de eixo horizontal apresenta um coeficiente de potência maior do que a H-Darrieus, e por esse motivo mostrou melhor rendimento.

Levando-se em consideração o custo de aquisição e de instalação da turbina e o custo de manutenção, independente do sistema ser *Off Grid* ou *Grid Tie*, pode-se perceber que a viabilidade do projeto eólico está no tempo de retorno do investimento, ou seja, no tempo necessário para gerar eletricidade suficiente para compensar a energia consumida na residência.

Quanto ao custo do gerador, sabe-se que quanto maior for sua capacidade de produção de energia, maior será o investimento inicial. Em contrapartida, menor será o custo da energia não eólica consumida. Para as turbinas analisadas, dado o preço de mercado é notório a diferença entre as turbinas, sendo um lucro de R\$ 6093,00 para a turbina de Eixo Horizontal.

Portanto, como neste trabalho o objetivo é verificar a eficiência das turbinas dadas as velocidades do vento local, viu-se que há viabilidade em sistemas eólicos residenciais, diferenciando-se a escolha da turbina pelo investimento inicial, a potência gerada e a eficiência da microturbina. Um trabalho futuro seria aprofundado com a determinação de qual sistema usar, se seria mais viável o conectado a rede ou não.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Hoje o uso da energia dos ventos, devido os avanços tecnológicos, tem sido em geração de eletricidade. A relação entre a evolução da demanda total de energia e o nível de atividade econômica é o motivo da geração de energia residencial.

As tecnologias de turbinas atuais apresentam-se em diversas topologias, dentre elas as de eixo vertical e a de eixo horizontal. Para a escolha da turbina há a necessidade de verificar qual a velocidade do vento: mínima para o funcionamento, a necessária para alcançar a potência nominal e a que faz o sistema desligar-se.

Essa tecnologia é estudada por diversos pesquisadores e centros de pesquisas, como mostra o estado da arte no capítulo 2, onde obtiveram significativos resultados mostrando a viabilidade do uso da mesma.

Portanto, o presente estudo buscou analisar se a região do Semiárido Potiguar possuía capacidade de gerar energia elétrica, utilizando turbinas de pequeno porte, a partir da fonte eólica. Tomando como referencia a cidade de Pau dos ferros, para os cálculos, foi usado a velocidade média anual dos ventos e a densidade relativa do ar. Visto que é possível gerar energia, buscou-se determinar qual turbina, aplicada a residências, apresentaria uma maior capacidade de potência gerada.

Dadas as microturbinas analisadas, obteve-se com maior eficiência a topologia de eixo horizontal. No caso do funcionamento com máxima eficiência, ou seja, com as perdas mínimas e com velocidade do vento máxima permitida, a potência nominal, de acordo com dados de fábrica, corresponde a 1 kW. Já para a velocidade local, gerou 84,77 W. Vale ressaltar que a potência pode variar mensalmente, podendo vir a produzir uma maior quantidade de energia para períodos diferentes.

Portanto, pode se concluir que a finalidade de analisar a eficiência energética das turbinas eólicas para aplicação residencial na região do Semiárido Potiguar foi atingida contribuindo com os estudos na geração da energia elétrica residencial a partir da energia eólica, já que a importância do presente trabalho está em o aproveitamento máximo das energias que a região oferece.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/>>. Acessado em 10 de Julho de 2017.
- ADEGAS, F. D. **Introdução ao Controle de Aerogeradores de Pequeno Porte**. Disponível em: <https://www.eventize.com.br/eventize/upload/000388/files/8_CONTROLE%20DE%20TEEP.pdf>. Acessado em 06 de Ago de 2017
- ALBIERO, D. et al., **Turbina eólica para agricultura familiar do semiárido com inovações tecnológicas para baixas velocidades de vento**. REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA, v. 45, n. 1, p. 186-196, jan-mar, 2014.
- ALMEIDA, A. T. P. e SILVA M. M. **Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas**. 2011. 72 p. TCC (Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília – Faculdade de tecnologia, Brasília, Junho, 2011.
- ALMEIDA, L. R. G. F. et al. **Metodologia da determinação dos parâmetros característicos de sistemas eólicos de geração de energia**. v.9. n.1. 15-27 p. Jan/Jun 2008.
- ALMIÑANA, C. C. e PENEIRO, J. C. **Montagem e Testes de uma Turbina Eólica de Pequeno Porte**. Anais do XVIII Encontro de Iniciação Científica – ISSN 1982-0178. Pontifícia Universidade Católica – PUC, 24 e 25 de Setembro, 2013.
- AMÊNDOLA, C. A. M. Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso. 2007, 216 p. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ANEEL. **A busca da Articulação entre ações de incentivos**. REVISTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. v.1. 41 p. 2013 – Brasília: ANEEL, 2013.
- ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. – Brasília : ANEEL, 2008. 236 p.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica**. 2 ed. vol 1. 2005. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acessado em 10 de Julho de 2017.
- ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acessado em 20 de Agosto de 2017.
- ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed. – Brasília : ANEEL, 2016. 31 p.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, de Novembro de 2015. **Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acessado em: 13 de Jul de 2017.
- ARGENTINO, F. L e BEPPU, S. K. **Projeto e Construção de Turbina Eólica para Instalações comerciais e Residenciais**. [2007]. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_011_2007.pdf>. Acessado em 02 de set de 2017.
- ARRAIS, E. JR. **Estratégia de Conversor para Interligação de Sistemas de Geração Eólica à Rede Elétrica**. 83 p. 2014, Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2014.

ASSIS, A. **A energia eólica para o consumo residencial**. 2015, 33 p. TCC (Especialização em Economia e Meio Ambiente no curso de Pós-graduação em Curso de Especialização em economia e meio ambiente) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BENITO, T. P. **Práticas de Energias Eólicas**. Porto: Publinústria. 2012.

CARDOSO, J. M. M. e FERREIRA, D. H. L. **Equações matemáticas e conceitos físicos aplicados a uma turbina eólica vertical de pequeno porte**. REVISTA BRASILEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, v.2, n.3, Itapetininga, 2015.

CARMO, D. M. F.G. **Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano**. 2012, 32 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

CERNE. **A Indústria dos Ventos e o Rio Grande do Norte** – Brasil. Natal: Smartpublishing Mídias na Rede, 2014. 28 p.

CRESESB. **Aplicação dos Sistemas Eólicos**. 2008. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=251>. Acessado em 17 de Agosto de 2017.

CRESESB. **História da Energia Eólica e suas Utilizações**. 2017. Disponível em:< http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_eolica>. Acessado em 13 de Agosto de 2017.

CRESESB. **Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em:< <http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acessado em: 14 de julho.

ENERGY GREEN. **Modelo de Geração Distribuída da Aneel**. Disponível em:< <http://energygreenbrasil.com.br/?p=6381>>. Acessado em 07 de Outubro de 2017.

FELIPE, D. B. L. et.al. **Energia eólica: análise sobre o potencial eólico brasileiro**. REVISTA DE DIVULGAÇÃO DO PROJETO UNIVERSIDADE PETROBRAS E IF FLUMINENSE, v. 1, p. 267-278, 2010.

FILHO, W. P. B. e AZEVEDO, A. C. S. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: VANTAGENS E DESVANTAGENS**. In: II Simpósio de Estudo e Pesquisa em Ciências Ambientais, 2013, Amazônia.

GWEC. **Global Wind Statistics 2016**. Disponível em: < http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2016_EN_WEB.pdf>. Acessado em 05 de Outubro de 2017.

INSTITUTO IDEAL. **Como faço para ter Energia Eólica em minha Casa?** . Disponível em:< <http://institutoideal.org/guiaeolica/>>. Acessado em 28 de Jul de 2017.

JERVELL, J. T. **Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**. 2008, 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

JUNIOR, E. R.N. **Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte**. 2008. 188 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

MATTUELLA, J. M. L. **Avaliação em túnel de vento do comportamento da camada limite atmosférica em terrenos complexos**. 2012, 286 p. Tese (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MENDES, A. L. S. e PINTO, M. M. **Autoprodução e Produção Independente de Energia Elétrica a partir de Fontes Renováveis no Brasil**. In: VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2011, Vitória – ES.

METEOBLUE. **Clima Pau dos Ferros**. Disponível em:< https://www.meteoblue.com/pt/tempo/previsao/modelclimate/pau-dos-ferros_brasil_3392775 >. Acessado em 14 de Jul de 2017.

MME. **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese, ano base 2016**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE. 2017.

MME. **Energia Eólica no Brasil e Mundo. Ano base 2015**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética – EPE. 2016.

PINTO, A. C e NETO, P. J. S. **Uma Revisão do Estado da Arte sobre a Aplicação de Aerogeradores de Pequeno Porte no Contexto das Redes Inteligentes**. REVISTA CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS, Vol.14, n.1, Jan/Jun, 2012.

PINTO, M.S.S. Especificações de projeto para medições de velocidade de vento utilizando anemômetro ultrassônico com o método de diferença de fase. 2006, 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2006.

PIRES, J. P. C. **Proposta de um sistema com aplicativo de simulação na área de energia eólica**. 2017, 226 p. Tese (Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

REIS, M. M. **Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo**. [2014]. Disponível em:< http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/178/arquivos/Fontes%20Alternativas/analise_custo_ger_eolico_1kW.pdf >. Acessado em 21 de Set de 2017.

ROSSI, P. H. J. e OLIVEIRA, C. P. **Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica**. Disponível em:< <http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=12> >. Acessado em 22 de Set de 2017.

SIMONSEN, H. **Projeto e construção de turbina eólica de baixa Potência**. [2009]. Disponível em:< http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2009/Artigos/Art_TCC_039_2009.pdf >. Acessado em 01 de Agosto de 2017.

SOUSA et. al. **Gestão energética e inovação sustentável: a formação de preço da energia eólica no estado do rio grande do norte**. REVISTA DE ADMINISTRAÇÃO E INOVAÇÃO, São Paulo, v. 11, n.3, p. 255-280, jul./set. 2014.

SOUSA, I. D. P. **Projeto e ensaios de pás para turbinas eólicas de pequeno porte com diferentes correções geométricas na ponta e na raiz da pá**. 2014, 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

Tedesco, H. T. **Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potencia convertida de uma turbina eólica de eixo vertical**. 2015, 20 p. TCC (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TIBOLA, G. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. 259 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Catarina, FLORIANÓPOLIS, 2009.

VERDUM, V. **Projeto de Aerogerador com segurança inerente para aplicação Urbana.** 2013, 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WENZEL, G.M. **Projeto Aerodinâmico de pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal.** 2007. 74 p. TCC (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio grande do Sul. Porto Alegre, Novembro, de 2007.