

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

CÍCERO FRANCIVAN SOARES BRAZ FILHO

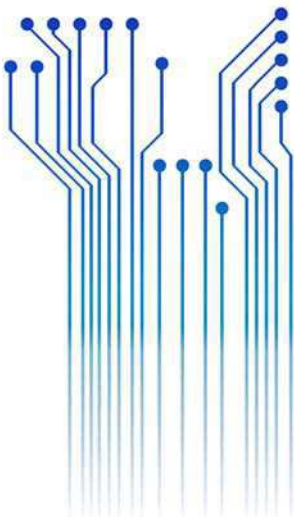


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
FUNDAMENTOS DA MICROPRODUÇÃO EÓLICA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2016

CÍCERO FRANCIVAN SOARES BRAZ FILHO

FUNDAMENTOS DA MICROPRODUÇÃO EÓLICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, 2016

CÍCERO FRANCIVAN SOARES BRAZ FILHO

FUNDAMENTOS DA MICROPRODUÇÃO EÓLICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Graduação de  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Aprovado em        /        /

**Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Aos meus pais, minha eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado forças para nunca desistir e sempre seguir em busca dos meus sonhos, em especial este, que é me tornar um profissional de engenharia.

Agradeço aos meus pais, Maria Izete e Cícero Francivan, e aos meus tios, Maria do Carmo e José Marques, pelo apoio incondicional em todos os momentos necessários nessa caminhada, estes que sempre acreditaram em mim.

Agradeço aos amigos, colegas e familiares, que sempre foram um apoio especial em todos os momentos, e nunca me permitiram desistir.

Agradeço ao meu orientador Leimar de Oliveira, que se dispôs do seu tempo e paciência para me ajudar na confecção desse trabalho.

Agradeço ao professor Ubirajara Meira, que se dispôs de seu tempo para avaliar esse trabalho, como também pelas sugestões valiosas que serão sempre consideradas em minha carreira profissional.

Finalmente agradeço a todas as pessoas que me deram suporte, seja no decorrer da graduação, seja na vida pessoal.

*“ Já foi dito que astronomia é uma experiência de humildade e criadora de caráter. Não há, talvez, melhor demonstração da tola presunção humana do que esta imagem distante do nosso minúsculo mundo. Para mim, destaca a nossa responsabilidade de sermos mais amáveis uns com os outros, e para preservarmos e protegermos o pálido ponto azul, o único lar que conhecemos até hoje”*

Carl Sagan.

## RESUMO

O presente trabalho de pesquisa tem como propósito realizar um estudo sobre a fonte renovável de energia eólica que, após a crise energética de 2001, vem ganhando espaço no cenário brasileiro nos últimos anos com investimento em novas tecnologias. É necessário ressaltar a microprodução de energia eólica, pois, com a crise e as recentes flutuações climáticas, afetando principalmente os recursos hídricos existentes, há uma tentativa de popularização da mesma a partir das novas regulamentações impostas, entre elas a resolução nº 482/12; a pesquisa partiu de livros, normas, artigos e mídias especializadas do setor. A regulamentação da geração distribuída pela resolução 482/12, com a implantação do sistema de compensação, e a IEC 61400-2, incentivaram as empresas de fabricação de turbinas e componentes para geração eólica, como também se tornou uma alternativa de economia de energia além de contribuir com a matriz energética nacional, apesar dos custos dos sistemas de microprodução eólica, obstáculo ainda a ser vencido.

**Palavras-chave:** energia; renovável; eólica; normas; sistema de compensação; microgeração.

## ABSTRACT

This research work aims to conduct a study on the renewable source of wind power, after the energy crisis of 2001, has been gaining ground in the Brazilian scene in recent years with investment in new technologies. It is necessary to emphasize wind power microproduction, because with the crisis and recent climatic fluctuations, mainly affecting the existing hydrous resources, there is an attempt to popularize the same from the new regulations imposed, between them, the resolution 482\12; the research started from books, standards, articles and specialized industry media. The regulation of distributed generation by resolution 482\12, with the implementation of the compensation system, and IEC 61400-2, encouraged the companies manufacturing turbines and components for wind power, but also has become an energy-saving alternative contributing to the national energy matrix, despite the costs of wind microgeneration systems, obstacle yet to be overcome.

**Keywords:** energy; renewable; wind power; standards; compensation system; microgeneration.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Moinho de vento tipo holândes.....	18
Figura 2 - Cata ventos multi pás.....	19
Figura 3 - Turbina eólica com eixo vertical .....	20
Figura 4 - Turbina eólica de brush .....	21
Figura 5 - Turbina experimental da NASA, Mod-0 .....	22
Figura 6 - Primeira turbina eólica de Fernando de Noronha .....	23
Figura 7 - Segunda turbina eólica de Fernando de Noronha .....	24
Figura 8 - Atlas Eólico Brasileiro.....	27
Figura 9 - Anemômetro de copo e cata-ventos.....	30
Figura 10 - Rosa dos Ventos da Cidade de Campina Grande .....	32
Figura 11 - Densidade de probabilidade de Weibull. ....	34
Figura 12 - Esquema representativo da lei de Betz .....	39
Figura 13 - Curva de Potência de um Aerogerador .....	40
Figura 14 - Aerogerador de Eixo Horizontal.....	42
Figura 15 - Aerogerador de Eixo Vertical .....	43
Figura 16 - Sistemas de Forças num Perfil Alar.....	45
Figura 17 - Esquema comum de um Aerogerador de Pequena Potência.....	50
Figura 18 - IEC 61400-2 Método de Decisão.....	52

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos Aerogeradores de Baixa Potência.....	37
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IEC	International Electrotechnical Commission
NASA	National Aeronautics and Space Administration
IEA	Instituto de Aeronáutica e Espaço
CTA	Centro de Tecnologia Aeroespacial
ITA	Instituto Técnico Aeroespacial
RN	Rio Grande do Norte
PROEOLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESEF	Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
BA	Bahia
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

## LISTA DE SÍMBOLOS

kW	Quilo-Watt
MW	Mega-Watt
m	Metro
kVA	Quilo-Volt Ampère
V	Volt
RPM	rotações Por Minuto
m/s	Metros por Segundo
kg	Quilo-Grama
W/m <sup>2</sup>	Watt por metros quadrados
u	Velocidade
$\rho$	Massa Especifica do Ar
A	Área
P <sub>disp</sub>	Potência Disponível
k	Parâmetro de Forma da Distribuição de Weibull
c	Parâmetro de Velocidade da Distribuição de Weibull
$\bar{u}$	Velocidade Média
$\Gamma$	Função Gamma
$\sigma$	Variância
u <sub>ma</sub>	Velocidade Média Anual
C <sub>p</sub>	Coeficiente de Potência
P <sub>mec</sub>	Potência Mecânica
$\alpha$	Ângulo de Ataque
$\beta$	Ângulo de Passo
$\varphi$	Ângulo de Escoamento

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	15
2	Energia Eólica.....	17
2.1	Evolução Histórica da Energia Eólica no Mundo.....	17
2.2	Evolução Histórica da Energia Eólica no Brasil.....	22
3	Recurso Eólico.....	25
3.1	Os Ventos.....	25
3.2	Atlas Eólico Brasileiro.....	26
3.3	Potência dos Ventos.....	28
3.4	Velocidade dos Ventos .....	29
3.5	Rosa dos Ventos.....	31
3.6	Modelagem do Vento.....	32
3.6.1	Distribuição de Weibull .....	32
3.6.2	Distribuição de Rayleigh.....	34
4	Tecnologia para Microprodução Eólica.....	36
4.1	Introdução .....	36
4.2	Aproveitamento dos Ventos.....	37
4.2.1	Coeficiente de Potência E Limite de Betz.....	38
4.2.2	Curva de Potência .....	39
4.3	Classificação dos Aerogeradores .....	41
4.3.1	Aerogerador de Eixo Horizontal .....	41
4.3.2	Aerogerador de Eixo Vertical .....	42
4.4	Componentes de Um Aerogerador de Pequena Potência .....	43
4.4.1	Rotor.....	44
4.4.2	Controle de Potência e Velocidade .....	46
4.4.3	Sistema de Direcionamento.....	47
4.4.4	Gerador.....	47
4.4.5	Torre.....	47
4.5	Sistema de Regulação de Potência.....	48
4.5.1	Controlador de Carga ou Regulador de Carga .....	48
4.5.2	Conversores.....	49
5	Normativa .....	51
5.1	Norma Internacional IEC 61400-2.....	51

5.2	Resolução Normativa Nº 482.....	54
5.3	Comentários Sobre Custo .....	58
6	Conclusões .....	60
	Bibliografia.....	61

# 1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica no Brasil é em maior parte proveniente de usinas hidrelétricas que, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2014), em 2014 corresponde a 63,03% da geração. Em um cenário em que os recursos hídricos tornam-se cada vez mais escassos e a demanda por energia elétrica tende a aumentar, torna-se necessário a busca por fontes alternativas de geração de energia limpa e renovável.

Para ter um sistema de geração seguro para o crescimento do país, o sistema precisa ser equilibrado e diversificado para não se tornar dependente de poucas fontes geradoras, ou seja, quando entramos num período de poucas chuvas e os reservatórios das usinas diminuem, como nesse período de 2014 a 2016, começam os riscos de apagões e o aumento do custo da energia. Estas oscilações e incertezas contribuem para afastar os investimentos no país.

Observou-se durante a crise energética de 2001 uma tentativa de incentivar os empreendimentos de geração de energia eólica no país, que além de incentivar o desenvolvimento de fontes renováveis, abriu caminho para o surgimento das indústrias de componentes e turbinas eólicas. Portanto, justifica-se o presente estudo pela necessidade de conhecer e reunir informações sobre a microgeração e mineração em energia eólica.

Acredita-se que com as novas regulamentações que permitem a venda, aliada ao ganho de créditos, do excedente da energia elétrica encontrada na microgeração, pode ocasionar na popularização deste tipo de energia renovável, possibilitando a inclusão de um novo mercado, de pequeno porte, na matriz energética nacional. Portanto, este trabalho tem o objetivo de fazer um estudo bibliográfico analisando o aproveitamento da energia dos ventos através da geração eólica, seus componentes na geração, como também abordar o que a Norma 482\12 da ANEEL e a norma internacional IEC 61400-2 e ainda abordar sobre as etapas de projeto, viabilização do processo de adesão na microgeração e o sistema de compensação.

O método utilizado será bibliográfico-dedutivo, partindo de pesquisas em livros, normas, artigos e mídias especializadas do setor.

O segundo Capítulo apresenta uma breve evolução histórica da utilização dos ventos para a geração de energia, as primeiras turbinas eólicas utilizadas para realização de tarefas mecânicas, normalmente associadas ao trabalho no campo, até os estudos iniciais dos primeiros modelos voltados à geração de energia elétrica. No terceiro Capítulo, abordaremos a energia eólica e seus fatores com um estudo sobre a potência dos ventos, medições, ferramentas e modelos estatísticos utilizados na modelagem dos ventos. O Capítulo 4 será dedicado a toda tecnologia envolta na microprodução de energia eólica, turbinas, fatores utilizados na concepção do sistema, tipos de turbina, componentes que compõe o sistema de microprodução, etc. O Capítulo 5, as normas que regulamentam a microgeração e a minigeração de energia eólica, os principais fatores que devem ser considerados no projeto de um aerogerador de pequena potência, como também o atual modelo de compensação implantado nas distribuidoras, além de um breve comentário sobre custos na microgeração.

Espera-se ao fim desta pesquisa mostrar que a geração de energia eólica pode ser uma das mais promissoras fontes naturais de energia renovável, limpa e amplamente distribuída e que a microgeração está se popularizando no país graças às novas regulamentações criadas, atraindo investidores que, apostando em tecnologias, estão diversificando a matriz energética do Brasil.



## 2 ENERGIA EÓLICA

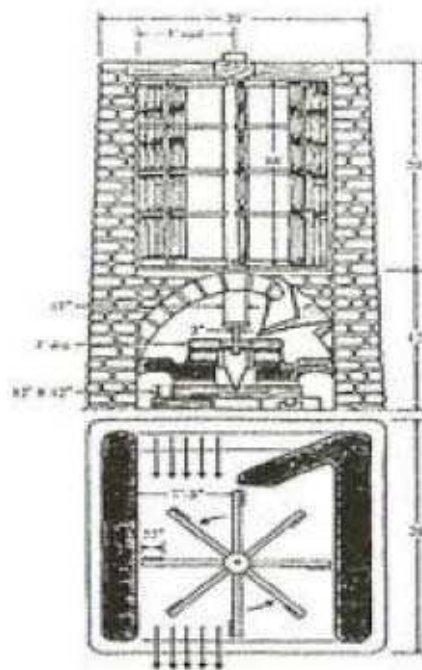
Será abordado neste Capítulo, como se deu o nascimento da utilização das forças dos ventos para produção de energia, desde os momentos onde a tecnologia era somente utilizada como ferramenta para trabalhos e tarefas mecânicas, as primeiras turbinas eólicas utilizadas para produzir energia elétrica, como também os primeiros estudos experimentais na busca por melhoria da tecnologia. Também é abordado como a tecnologia se desenvolveu no Brasil, as primeiras turbinas e estudos realizados para inserção da tecnologia no âmbito nacional.

### 2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

O uso dos ventos para geração de energia começou supostamente há 3000 anos devido às necessidades da agricultura em criar ferramentas para auxiliar nos trabalhos e tarefas como: bombeamento de água e moagem de grãos. No início as máquinas eram primitivas e pouco eficientes. (FADIGAS, 2011).

No ano de 1180 na Holanda, foi documentado o primeiro registro da utilização dos moinhos de vento. A utilização dos moinhos de vento tipo holandês, tornou-se referência para os países da Inglaterra e França onde tiveram grande influência econômica e agrícola por vários séculos, substituindo a força humana e animal e conseqüentemente otimizando várias atividades que dependiam da força motriz do vento. (PINTO, 2013).

Figura 1 - Moinho de vento tipo holandês



Fonte: (FADIGAS, 2011).

Segundo Milton Pinto (2013, p.9) o engenheiro civil inglês Jonh Smeaton (1724-1792) é o primeiro a tratar da questão do desempenho dos moinhos de vento em um enfoque mais científico. Entretanto um artigo do próprio Smeaton indica que outros já haviam feito experiências a respeito e cita os nomes de Rouse e B. Robins.

No Século 19 com o surgimento da máquina à vapor, países Europeus que faziam a utilização dos moinhos de vento entraram em declínio, fato que tornou duvidoso a eficácia da energia proveniente dos ventos. Diante desses fatos, os americanos foram impulsionados a aplicarem melhorias, tornando-os mais leves, simples, baratos e eficientes para utilizações em áreas rurais onde não havia recursos hídricos.

O Reverendo Leonhard R. Wheeler de Wiscinsin desenvolveu um modelo de turbina referência no padrão americano que era semelhante aos cata-ventos utilizados nos

bombeamentos de água, que recebeu o nome de cata-ventos multi-pás como são conhecidos até hoje, adaptados às condições rurais, de fácil operação e manutenção, estrutura de metal e um sistema de bombeamento constituído por bombas e pistões que eram favorecidos pelo alto torque em razão do grande número de pás. (FADIGAS, 2011).

Figura 2 - Cata ventos multi pás

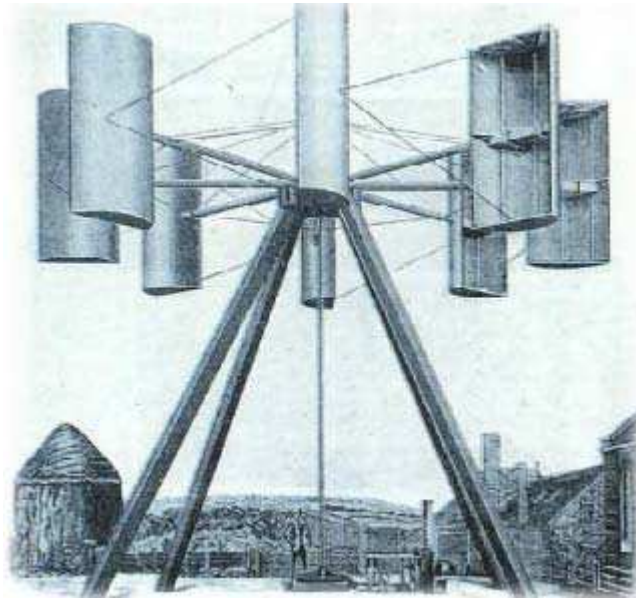


Fonte: (FADIGAS, 2011).

Ainda de acordo com Eliane A. Faria Amaral Fadigas (2011, p.14) em 1930 o programa de Eletrificação Rural causou o declínio desses nas áreas rurais. Atualmente alguns destes moinhos foram preservados como monumentos históricos.

De acordo com Milton Pinto (2013, p.13) o primeiro moinho de vento a gerar eletricidade foi construído em julho de 1887 na cidade escocesa de Glasgow pelo engenheiro eletricista e professor James Blyth (1839-1906). Em 1891, Blyth conseguiu a patente britânica da turbina. A máquina de 10 metros de altura e eixo vertical era utilizada para carregar acumuladores de energia que alimentava a assim a primeira casa do mundo a ter sua eletricidade fornecida por energia eólica.

Figura 3 - Turbina eólica com eixo vertical



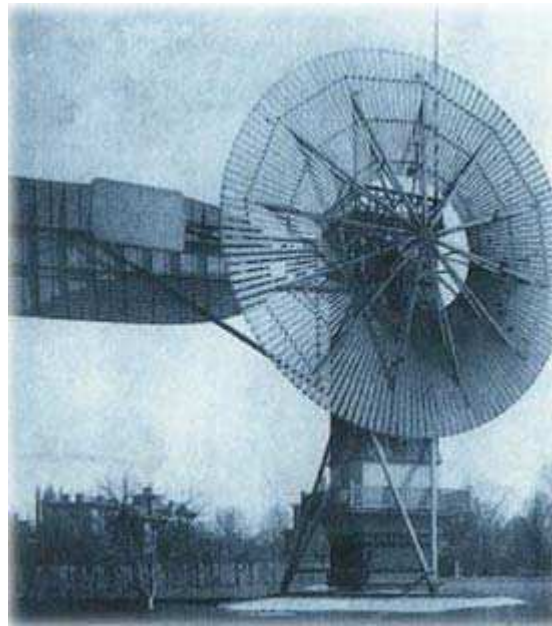
Fonte: (PINTO, 2013).

O ponto de transição entre os moinhos de vento e a moderna tecnologia da geração eólica veio em 1891 na cidade de Askov, com o Professor dinamarquês Poul La Cour, que construiu a primeira turbina eólica e em 1891, onde foram vistos dois modelos de testes, e com isto começaram a proliferar. (PINTO, 2013).

Segundo Eliane A. Faria Amaral Fadigas (2011, p.13) Tratava-se de uma turbina eólica acoplada a um gerador de corrente contínua (CC), cuja energia gerada era utilizada na eletrólise e no armazenamento do gás hidrogênio produzido, o qual foi utilizado em lâmpadas.

Com o advento da eletricidade, os engenheiros rapidamente perceberam que os moinhos de vento podiam ser usados como geradores elétricos e que a potência gerada poderia ser usada para a iluminação e aquecimento. Com o surgimento dos geradores elétricos no final do século XIX, eles começaram a ser utilizados em rotores para cata-ventos. Nos Estados Unidos em 1888 Charles Brush em Cleveland, Ohio montou uma máquina de eixo horizontal, bem maior que a máquina de Blyth, que consistia em 144 pás e quase 17 metros de diâmetro do rotor e uma torre com 18,3 metros de altura. O gerador eólico alimentava 12 baterias da casa que se tornou a primeira a ter eletricidade na cidade, e sua turbina tornou-se bastante difundida nos anos seguintes. (PINTO, 2013).

Figura 4 - Turbina eólica de brush



Fonte: (PINTO, 2013).

Após a Segunda Guerra Mundial, os preços dos combustíveis Carvão e Petróleo caíram, e isto proporcionou grande disponibilidade de combustível para a geração de eletricidade. Mesmo com a grande oferta de combustíveis, as tentativas de gerar energia elétrica por meio das turbinas eólicas estavam em andamento, mas a eletricidade gerada pela força dos ventos não despertava interesses devido ao fator econômico. (PINTO, 2013).

Segundo Milton Pinto (2013, p.27) a energia eólica voltou a apresentar interesse em meados dos anos 1970, durante a crise do petróleo. O preço do petróleo bruto multiplicou sua oferta de combustível foi diminuída. O programa de energia eólica do Governo Federal americano foi criado em 1973, com a autorização de um orçamento de 200 milhões de dólares.

Nos anos 1980, com subsídios do governo começaram a surgir programas para o desenvolvimento da energia eólica, inicialmente voltadas para a grande construção de grandes turbinas eólicas experimentais. Os recursos foram em sua maioria empregados em máquinas de grande porte, como a NASA Mod-0 de 100 kW e 38 metros de diâmetro e a MW Boeng Mod - 5B de 3,2MW. A partir de 1988 até a conclusão em 1995, as atividades da NASA com energia eólica foram no sentido da transferência de tecnologia para as organizações comerciais e acadêmicas. (PINTO, 2013).

Figura 5 - Turbina experimental da NASA, Mod-0



Fonte: (PINTO, 2013).

## 2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A energia eólica brasileira teve início em 1973, quando o IEA/CTA (Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro de Tecnologia Aeroespacial) construiu e fez o ensaio de 15 protótipos de turbinas eólicas em São José dos Campos/SP. O primeiro protótipo montado em 1976 tinha potência nominal de 20 kW e funcionou durante algumas semanas até apresentar problemas de fadiga na estrutura de suporte das pás. Após outras tentativas que também apresentaram problemas o projeto foi abandonado, mas os estudos do CTA incentivaram uma avaliação do potencial eólico para a geração de energia elétrica na Região Nordeste, o que pode ser considerado como o marco inicial da energia eólica no Brasil. (PINTO, 2013).

As primeiras medições foram realizadas pelo ITA (Instituto Técnico Aeroespacial) entre os anos de 1976 e 1977 que analisou os dados anemométricos medidos nos aeroportos, e com estes dados vários protótipos de turbinas eólicas de pequeno porte (de 2kW e 5kW) foram desenvolvidos e operados em um campo de testes no Centro de Lançamento de Foguetes da Barreira do Inferno, próximo a Natal/RN. Após análise de 5 anos de dados de 81 estações a 10 metros de altura, foi

feito um inventário do potencial eólico nordestino. Na década de 80 outros estudos de mapeamento eólico foram realizados e com destaque para os Estados de Minas Gerais e do Rio Grande do Sul. Ainda na década de 1980, a Eletrobrás e a Fundação Leonel Franca deram continuidade à confecção do primeiro Atlas do Levantamento Preliminar do potencial Eólico Nacional. (PINTO, 2013).

Ainda de acordo com Milton Pinto, (2013, p.272) a energia eólica no Brasil teve seu início em 1992 com o início da operação comercial da primeira turbina eólica Brasileira instalada no arquipélago de Fernando de Noronha, com um gerador assíncrono trifásico de 75kW de potência, torre treliçada de 23 m, 17 m de diâmetro do rotor e sistema de controle por estol passivo. O gerador tinha um transformador de acoplamento a rede (90kVA/380V/13,8kV rms), fator de potência igual a 93%, velocidade do rotor de 51 RPM, com velocidade nominal do vento a 12 m/s, partindo a 3,5 m/s e velocidade de corte de 23 m/s. Possuía dois sistemas de freio, sendo um aerodinâmico e o outro a disco e um eixo de velocidade à razão de 1/20. As três pás eram construídas de fibra de vidro e tinha 8.5 m de comprimento, 5994 e pesava 350 kg e na época da instalação correspondia a 10% da energia gerada no arquipélago que na época era exclusivamente térmica e a base de óleo diesel.

Figura 6 - Primeira turbina eólica de Fernando de Noronha



Fonte: (ANEEL, s.d).

A segunda turbina de Fernando de Noronha foi instalada em maio de 2000 e entrou em operação em 2001. As duas turbinas instaladas na ilha geram até 25% da eletricidade

consumida na ilha e estes projetos tornaram Fernando de Noronha o maior sistema híbrido eólico-diesel do Brasil.

Figura 7 - Segunda turbina eólica de Fernando de Noronha



Fonte: (ANEEL, s.d).

Devido ao alto custo da tecnologia e em parte pela falta de políticas para o setor, pouco se avançou nos dez anos seguintes. Em 2001 durante a crise energética foi criado o Programa Emergencial de Energia Eólica – PROEÓLICA que tinha como objetivo a contratação de 1.050 MW de projetos de energia eólica até dezembro de 2003. Falava-se da complementaridade sazonal do regime de ventos com os fluxos hidrológicos nos reservatórios hidrelétricos, no entanto este programa não obteve resultados e foi substituído pelo programa de incentivo às fontes alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA em 2004.

O PROINFA abriu caminho para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas e incentivou o desenvolvimento das fontes renováveis na matriz energética.



## 3 RECURSO EÓLICO

Será abordado neste Capítulo, os recursos provenientes dos ventos, como eles são formados, as ferramentas utilizadas no auxílio e fornecimento de dados acerca da velocidade do vento, entre elas, o atlas eólico e a rosa dos ventos, os instrumentos utilizados para realizar medições de velocidade do vento, a potência associada aos ventos, como também os modelos estocásticos para modelagem dos ventos.

### 3.1 OS VENTOS

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devido ao fato da radiação solar recebida na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares. A origem do vento é, portanto, a radiação solar. (CASTRO, 2003).

Os ventos mais fortes, mais constantes e mais persistentes ocorrem em bandas situadas a cerca de 10 km da superfície da terra. Como não é possível colocar os conversores eólicos nessas zonas, o espaço de interesse encontra-se limitado a algumas dezenas de metros na atmosfera. A estas alturas, o vento é diretamente afetado pela fricção na superfície, o que provoca uma diminuição na sua velocidade. Uma avaliação correta do potencial eólico com vista à produção de energia elétrica tem que basear-se em medidas de vento efetuadas especificamente para esse efeito. (CASTRO, 2003).

Esta não era a situação à data da elaboração dos primeiros estudos. Na verdade, os registos existentes eram provenientes de estações meteorológicas, as quais estão associadas à medição de dados para a aviação, agricultura, previsão do tempo, mas não para avaliação do potencial. Acresce que estas estações não estão normalmente localizadas nos sítios mais favorecidos do ponto de vista eólico, pelo que a extrapolação dos registos meteorológicos conduziu à avaliação por defeito do recurso. (CASTRO, 2003).

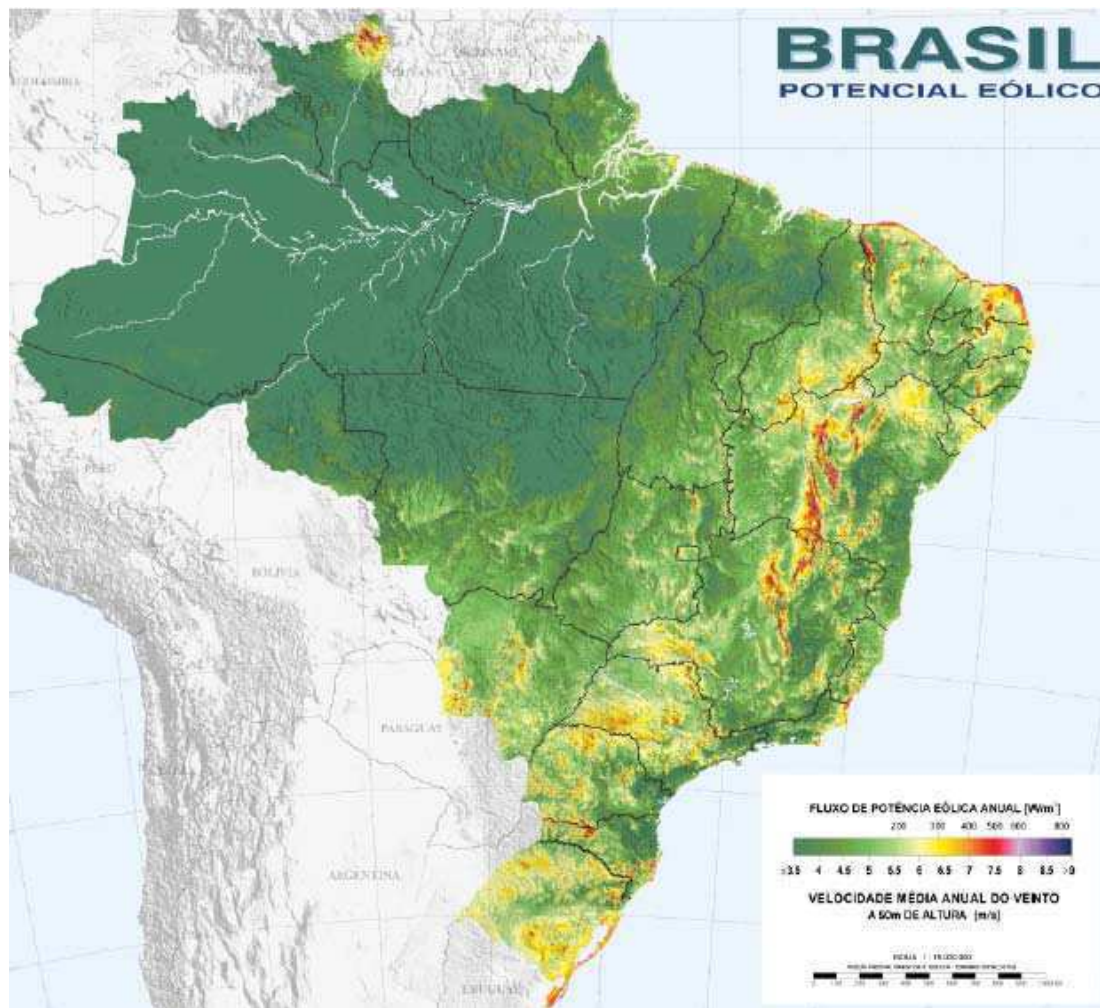
## 3.2 ATLAS EÓLICO BRASILEIRO

Como dito anteriormente, um dos fatores que limitam investimentos em empreendimentos eólicos é a falta de dados adequados e confiáveis. Este atlas vem preencher parte dessa lacuna, apresentando informações de qualidade sobre as áreas com bom potencial eólico no território nacional e suas principais características, tais como: velocidade média, direção, densidade de potência, etc.

O atlas do potencial eólico brasileiro constitui-se, assim, em um instrumento indicativo fundamental para que se possa pré-avaliar os recursos eólicos para geração de energia elétrica, sua principal finalidade, podendo também ser fonte de consulta para pesquisas acadêmicas e científicas, além de outras possíveis aplicações que utilizem dados dos ventos.

A Figura 8, retirada do Atlas Eólico Brasileiro, apresenta uma panorâmica geral do recurso eólico no Brasil, em termos da *velocidade média* (m/s) e da *densidade de potência* (W/m<sup>2</sup>) médias anuais, à altura de 50 metros.

Figura 8 - Atlas Eólico Brasileiro



Fonte: (CEPEL, 2001).

O mapa indica a tendência a velocidades maiores de vento no litoral brasileiro e também em áreas do interior favorecidas por relevo e baixa rugosidade. (CEPEL, 2001).

Em 1987, a CHESF – Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco finalizou um inventário do potencial eólico da região Nordeste, realizado a partir de processamento/análise de registros anemógrafos para um período de 5 anos (1977-1981) de 81 estações a 10m de altura, pertencentes à Rede Meteorológica do Nordeste – SUDENE. (CEPEL, 2001).

Os dados, processados pela Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, foram publicados em sumários e mapas de isolinhas para velocidades a 10 m de altura. As maiores velocidades médias anuais encontradas para a altura de 10 m foram de 5,5 m/s e 4,3 m/s, para Macau, RN e Caetitê, BA, respectivamente. (CEPEL, 2001).

Apesar de todas as suas limitações, o Atlas Eólico Brasileiro representa um esforço importante para produzir um instrumento de trabalho válido de avaliação do potencial eólico com vista à produção de energia elétrica.

### 3.3 POTÊNCIA DOS VENTOS

Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. As turbinas modernas são projetadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s. (CASTRO, 2003).

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante  $u$  (m/s). Na unidade de tempo, aquela coluna de ar, ao atravessar a seção plana transversal  $A$  (m<sup>2</sup>) do rotor da turbina, desloca uma massa  $\rho Au$  (kg/s), em que  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) é a massa específica do ar. (CASTRO, 2003).

A potência disponível no vento ( $W$ ) é, então, proporcional ao cubo da velocidade do vento:

$$P_{\text{disp}} = \frac{1}{2}(\rho Au)u^2 = \frac{1}{2}\rho Au^3. \quad (1)$$

A Equação (1) revela que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento: quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, mas duplicando a área varrida pelas pás da turbina, o aumento é só de duas vezes. Por outro lado, se a velocidade do vento desce para metade, a potência reduz-se a 12,5%. Tudo isto explica a importância crítica da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas no sucesso económico dos projetos de energia eólica. (CASTRO, 2003).

A informação sobre o recurso eólico de um local independentemente das características das turbinas a instalar, pode ser apresentada em termos da densidade de potência disponível no vento ( $W/m^2$ ), isto é, potência por unidade de área varrida pelas pás da turbina. (CASTRO, 2003).

### 3.4 VELOCIDADE DOS VENTOS

Em geral, na caracterização do recurso eólico, uma das etapas é a campanha de medida de vento, que geralmente é feita em uma janela de tempo de normalmente 5 anos, visando obter um histórico bem definido das velocidades dos ventos que circundam a região de interesse, para que assim, sejam feitos todos os cálculos necessários ao dimensionamento das turbinas eólicas. No caso dos aerogeradores de baixa potência, essa fase é, em geral, descartada. A razão para esta diferenciação é o **custo de fazer campanhas de medida de vento**, tanto em dinheiro (o custo não varia muito em função do tamanho da geração em valor absoluto, de modo que para os aerogeradores menores representa um grande esforço com relação ao custo do sistema), quanto em tempo (1 ano).

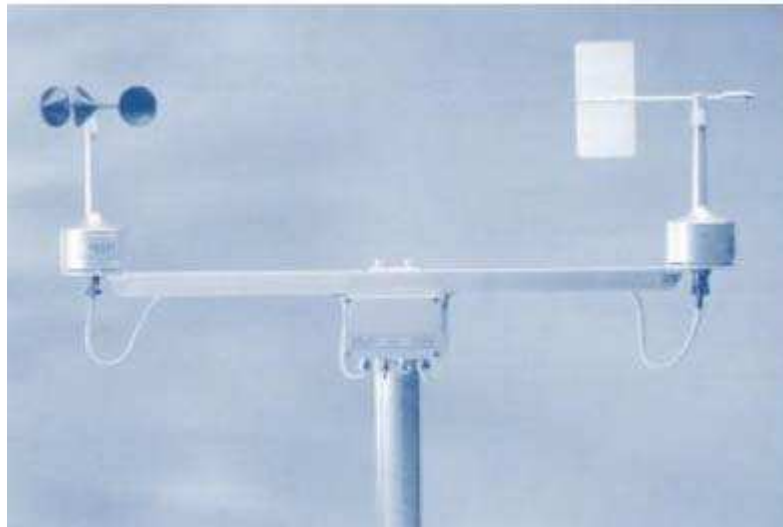
A medida do vento é realizada com os instrumentos denominados anemômetros e cata-ventos. A velocidade do vento é medida com os **anemômetros**, enquanto os cata-ventos medem a direção de onde provém o vento. Existem diferentes tipos de anemômetros, os mais utilizados para a avaliação do potencial eólico para aerogeradores de pequena potência são: (ARRIBAS, 2013).

- **Anemômetros de copo.** O anemômetro possui três ou quatro copos montados simetricamente ao redor de um eixo vertical. A velocidade de rotação é proporcional à velocidade do vento incidente.
- **Anemômetros de hélice.** O anemômetro possui uma hélice montada em um eixo horizontal. As características de resposta deste tipo de anemômetros quando o vento não é perpendicular ao plano de rotação, são relativamente baixas, de modo que são menos adequados do que os anemômetros de copos.

A direção do vento é medida normalmente com os **cata-ventos**, que consistem em um dispositivo montado sobre um eixo vertical que se move seguindo o vento quando este muda de direção.

Na figura 9 se representa um anemômetro de copos e uma cata-vento típico usado na avaliação de recursos eólicos.

Figura 9 - Anemômetro de copo e cata-ventos



Fonte: (ARRIBAS, 2013).

Para a realização de uma prospecção eólica de aerogeradores de pequena potência, os anemômetros e cata-ventos costumam ser colocados em torres suporte a uma altura mínima de 10 metros sobre o solo. É muito recomendável situar ao menos dois níveis de sensores para poder obter informação da variação vertical do perfil de velocidades (corte do vento), o que nos permitirá otimizar a escolha da altura da torre dos aerogeradores.

Em aplicações convencionais da energia eólica (não para meios urbanos), as torres de medida se situarão em lugares bem expostos a todas as direções e distantes de obstáculos (árvores, casas, etc.), para evitar a perturbação dos mesmos na medida do vento; em aplicações em meio urbano não está definido um procedimento de medida, devido a sua complexidade, de modo que continua sendo um campo de pesquisa. (ARRIBAS, 2013).

É recomendável coletar amostras de valores do vento a cada 1 ou 2 segundos, e realizar médias em intervalos de 1 minuto (para aerogeradores pequenos) ou 10 minutos (para aerogeradores de maior tamanho).

Para poder ter uma referência da densidade do ar no local se recomenda realizar medidas de pressão atmosférica e temperatura, para o que são utilizados barômetros e termômetros, respectivamente. Para estes valores é suficiente a coleta de medidas horárias.

Quando para um local determinado pretende-se avaliar a possibilidade de utilização da energia eólica, a primeira ação requerida é quantificar o potencial do vento no mesmo. Normalmente utilizam-se valores estatísticos considerados em pelo menos um ano, para considerar as variações ao longo de todas as estações. Os valores utilizados são:

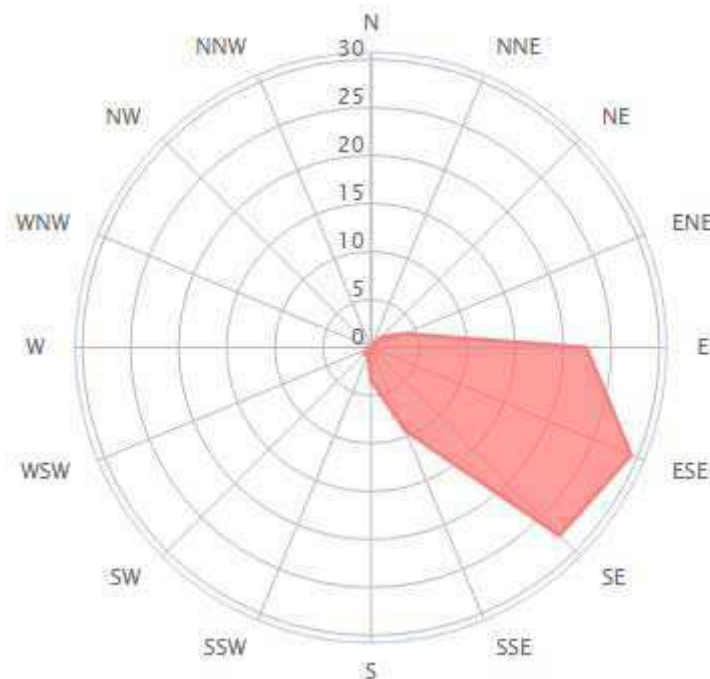
- **Valor médio da velocidade do vento:** O primeiro valor que dará informação sobre o recurso eólico é a velocidade média anual do vento. Devido à dependência da potência com o cubo da velocidade, o valor médio do vento aporta uma primeira informação muito importante para considerar um local eólico. Do mesmo modo, em sistemas isolados da rede elétrica convencional, será de muita utilidade conhecer tanto os valores médios mensais, que nos darão informação sobre as variações sazonais da velocidade no local, quanto as variações de vento ao longo do dia (dia tipo), o que permitirá conhecer a complementariedade da energia eólica com outras fontes energéticas, como a energia solar, e sua relação com os consumos.
- **Valores médios de temperatura e pressão ambiente:** Variam muito mais lentamente do que a média de vento.
- **Variação da velocidade do vento com a altura (perfil vertical):** Devido principalmente ao atrito da corrente de ar com a superfície terrestre, há também uma variação da velocidade do vento com a altura sobre o solo, que geralmente é crescente. Assim, a utilização de torres altas é vantajosa, pois permite aproveitar os ventos das camadas mais altas. Contudo, isto nem sempre é possível nas aplicações com pequenos aerogeradores. Esta variação costuma ser representada através de uma função potencial ou através de uma função logarítmica.
- **Turbulência:** Pequenas variações do vento sobre o valor médio. Em ambientes urbanos é possível que as variações são importantes. (ARRIBAS, 2013).

### 3.5 ROSA DOS VENTOS

A informação das direções predominantes de onde vem o vento será fundamental para escolher a localização dos aerogeradores. A representação mais utilizada da distribuição direcional dos ventos é a chamada “rosa dos ventos” do local, na qual se representa a porcentagem de tempo em que o vento provém de uma determinada direção (a direção do vento se refere sempre ao lugar de onde procede a corrente de ar, vista do

ponto de referência). Às vezes se reflete na rosa dos ventos a distribuição de velocidades médias do vento para cada setor direcional. (ARRIBAS, 2013).

Figura 10 - Rosa dos Ventos da Cidade de Campina Grande



Fonte: (WINDFINDER, 2016).

Nessa rosa dos ventos, nota-se a direção dos ventos anual até o respectivo mês de setembro do ano de 2016, na mesma percebe-se que o vento se desloca essencialmente na direção leste e sudeste, podendo variar de acordo com a época e estação do ano.

## 3.6 MODELAGEM DO VENTO

Nessa seção, abordaremos as principais ferramentas e modelos matemáticos/estatísticos para modelagem dos ventos. Será abordado as distribuições de Weibull e de Rayleigh, essa última em especial, pois a mesma é amplamente utilizada no enquadramento do perfil dos ventos por proporcionar menores custos, assim, aumentando a viabilidade do sistema de pequena potência.

### 3.6.1 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Os registros da densidade de probabilidade ganham importância se puderem ser descritos por expressões analíticas. Têm sido sugeridas várias distribuições



probabilísticas para descrever o regime de ventos, mas a distribuição de *Weibull* é normalmente considerada como a mais adequada. A expressão matemática da função densidade de probabilidade de *Weibull* é: (CASTRO, 2003).

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{c} \left( \frac{\bar{u}}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{\bar{u}}{c} \right)^k \right). \quad (2)$$

em que  $\bar{u}$  é a velocidade média do vento,  $c$  é um parâmetro de escala, com as dimensões de velocidade, e  $k$  é um parâmetro de forma, sem dimensões. O parâmetro  $c$  está relacionado com a velocidade média através da função *Gamma* –  $\Gamma$ : (CASTRO, 2003).

$$\bar{u} = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right). \quad (3)$$

e o parâmetro  $k$  é uma medida da variância dos dados:

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right) - \left( \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Existem vários métodos mais expeditos de calcular os parâmetros  $k$  e  $c$ . Um dos mais usuais envolve uma regressão linear e é sumariamente apresentado a seguir.

A função *probabilidade acumulada* – probabilidade de a velocidade média do vento exceder o valor  $u$  – de *Weibull* –  $F(\bar{u})$  – é dada pela expressão: (CASTRO, 2003).

$$F(\bar{u}) = \exp \left( - \left( \frac{\bar{u}}{c} \right)^k \right). \quad (5)$$

A Equação 7 pode ser expressa como uma função linear do tipo:

$$Y = AX+B. \quad (6)$$

Em que:

$$Y = \ln[-\ln(F(\bar{u}))], \quad (7)$$

$$X = \ln(\bar{u}). \quad (8)$$

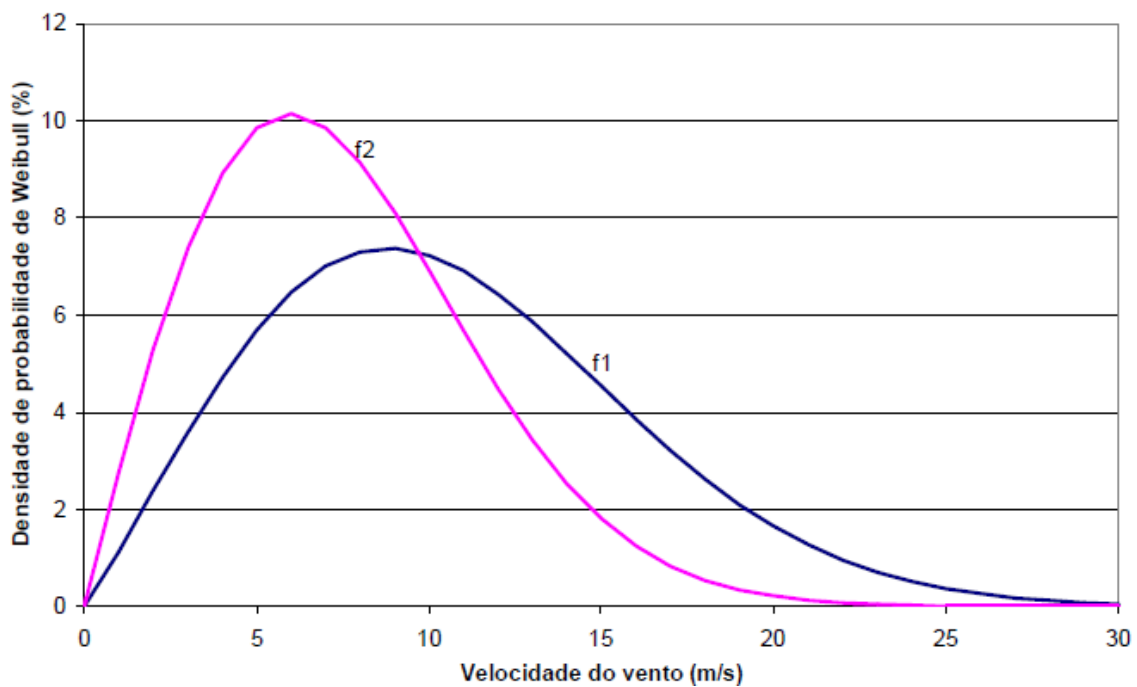
Os parâmetros **k** e **c** estão relacionados com **A** e com **B**, através de:

$$k = A, \quad (9)$$

$$c = \exp\left(-\frac{B}{A}\right). \quad (10)$$

Na Figura 11 representam-se duas funções densidade de probabilidade de Weibull, **f1** e **f2**, caracterizadas por  $k_1 = 2,1$ ;  $c_1 = 12$  m/s e  $k_2 = 1,7$ ;  $c_2 = 8$  m/s.

Figura 11 - Densidade de probabilidade de Weibull.



Fonte: (CASTRO, 2003).

### 3.6.2 DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGHT

A distribuição de Rayleight nada mais é que a distribuição de Weibull para quando o parâmetro  $k = 2$ , onde:

$$f(\bar{u}) = \frac{\pi}{2} \frac{\bar{u}}{u_{ma}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{u}}{u_{ma}}\right)^2\right]. \quad (11)$$

Onde,  $u_{ma}$  é a velocidade média anual.

Essa distribuição é muito importante, pois em locais onde não há muita informação disponível sobre o histórico de ventos, basta possuir os valores de velocidades média e média anual para construir um perfil válido para análise e dimensionamento do sistema no local. Essa distribuição é muito utilizada nos sistemas de microprodução de energia eólica pois, em geral, é muito custoso fazer campanhas de medição de velocidade, não compensando assim a instalação do sistema.

## 4 TECNOLOGIA PARA MICROPRODUÇÃO EÓLICA

Será abordado neste Capítulo, as principais tecnologias que compõe um aerogerador de pequena potência, como também sua classificação quanto ao tipo de eixo em relação ao plano de incidência dos ventos.

### 4.1 INTRODUÇÃO

Além do grande interesse despertado pelos grandes parques eólicos no gama dos multi megawatt, os mercados para sistemas eólicos de pequena potência (tanto isolados, quanto conectados à rede) podem resultar atrativos se os preços da eletricidade e dos combustíveis fósseis aumentarem ou, como ocorre em muitos países em vias de desenvolvimento, quando a distância da rede elétrica mais próxima é muito grande.

No entanto, apesar da maturidade alcançada no desenvolvimento dos grandes aerogeradores para conexão a parques eólicos, o estado da arte dos pequenos aerogeradores está ainda distante da maturidade tecnológica e da competitividade econômica. Os custos médios para a atual mini-eólica isolada variam entre 2500 e 6000 \$/kW instalados, enquanto em aplicações de geração distribuída um pequeno aerogerador pode variar entre 2700 e 8000 \$/kW. Ambas gamas contrastam com os custos específicos de os grandes aerogeradores, que estão em torno de 1500 \$/kW.

Com relação à análise do comportamento dos pequenos aerogeradores, a densidade de potência média está entre 0.15 e 0.25 kW/m<sup>2</sup>, devido ao limitado potencial eólico disponível nos locais da mini-eólica em comparação com as localizações típicas dos aerogeradores de grande tamanho.

A tecnologia da mini-eólica é claramente diferente da utilizada em grandes aerogeradores. Estas diferenças afetam a todos os subsistemas: principalmente ao sistema elétrico e ao de controle, mas também ao desenho do rotor. A maioria dos aerogeradores de pequena potência existentes no mercado foram construídos de forma quase artesanal.

A mini-eólica tem um grande potencial, mas ainda existem desafios a superar. Existem normas específicas para a mini-eólica (como o padrão IEC 61400-2 para o desenho de aerogeradores de pequena potência), e são também aplicados alguns padrões

da eólica em geral, como o de medida da curva de potência ou o de medida de emissões sonoras; contudo, resta ainda trabalho pela frente no campo normativo para conseguir incrementar a qualidade na fabricação destes equipamentos.

No entanto, o mercado é promissor tanto nos países em desenvolvimento, quanto em países desenvolvidos, e tanto para aplicações conectadas à rede, quanto para aplicações isoladas. (ARRIBAS, 2013).

Na seguinte tabela se apresenta a categorização das gamas comerciais de pequenos aerogeradores em função da potência nominal, de poucos watt até 100 kW. (ARRIBAS, 2013).

Tabela 1 - Classificação dos Aerogeradores de Baixa Potência

<b>Potência Nominal (kW)</b>	<b>Área de varredura de rotor (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Subcategoria</b>
$P_{\text{nominal}} < 1 \text{ kW}$	$A < 4.9 \text{ m}^2$	Pico eólica
$1 \text{ kW} < P_{\text{nominal}} < 7 \text{ kW}$	$A < 40 \text{ m}^2$	Micro eólica
$7 \text{ kW} < P_{\text{nominal}} < 50 \text{ kW}$	$A < 200 \text{ m}^2$	Mini eólica
$50 \text{ kW} < P_{\text{nominal}} < 100 \text{ kW}$	$A < 300 \text{ m}^2$	(por definir)

Fonte: (ARRIBAS, 2013).

Os valores que definem as gamas e nesta categorização foram escolhidos a partir das normas relacionadas com a mini-eólica. O valor de 40 m<sup>2</sup> foi o limite estabelecido na primeira edição do padrão IEC-61400-2, e é a gama prevista atualmente para integração no meio urbano; o limite de 200 m<sup>2</sup> foi o estabelecido na segunda edição do mencionado padrão em 2006, e inclui a maior parte de aplicações de mini-eólica. Finalmente, o limite de 100 kW é definido em alguns países como a máxima potência que se pode conectar à rede elétrica de baixa tensão. A gama da pico-eólica se é normalmente aceita para aerogeradores de menos de 1 kW. (ARRIBAS, 2013, p.3).

## 4.2 APROVEITAMENTO DOS VENTOS

Será abordado nessa seção, um dos principais fatores utilizados para avaliação no que diz respeito a conversão da energia cinética, proveniente dos ventos, em energia elétrica, bem como suas limitações. Aproveitando a oportunidade, será apresentado

também, uma das principais ferramentas gráficas utilizadas para avaliação de desempenho das turbinas eólicas.

#### 4.2.1 COEFICIENTE DE POTÊNCIA E LIMITE DE BETZ

A potência disponível nos ventos não pode ser integralmente convertida em potência mecânica no veio da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula. A aplicação de conceitos da mecânica de fluídos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão eolo-mecânica: o seu valor é 59,3%, e é conhecido por *Limite de Betz*.

O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado por: (CASTRO, 2003).

$$C_p(u) = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} \quad (12)$$

Onde,  $P_{mec}$  é a potência disponível no veio da turbina. (CASTRO, 2003).

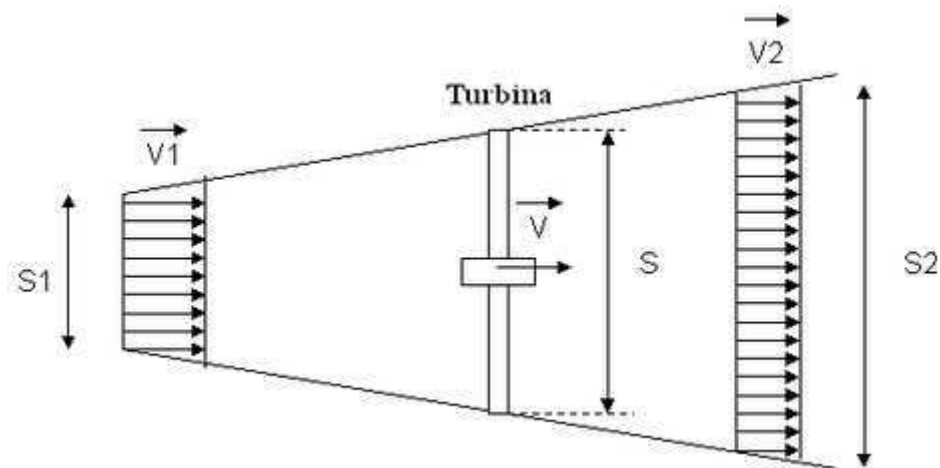
Não está normalizada a designação a dar ao rendimento expresso pela Equação 12. São comuns as designações de *coeficiente de potência*, *fator de aproveitamento* ou *rendimento aerodinâmico*. Na prática, a terminologia mais usada é  $C_p$ . (CASTRO, 2003).

O modelo desenvolvido por Albert Betz, pode ser usado para determinar o funcionamento e a potência de um rotor ideal. Este modelo é baseado na teoria da quantidade de movimento axial.

Basicamente este modelo consiste na passagem de ar por um tubo de corrente com um disco no seu interior, sendo este o simulador de uma turbina. O tubo de corrente tem duas secções transversais distintas e no local de transição de secção encontra-se o disco/turbina que vai criar uma descontinuidade na pressão do ar. A teoria do disco atuador fornece uma base lógica para demonstrar que a velocidade do escoamento no rotor é diferente da velocidade de corrente livre.

A representação esquemática da Lei de Betz está presente na seguinte Figura 12.

Figura 12 - Esquema representativo da lei de Betz



Fonte: (UNIVERSIDADE DO MILHO, 2016)

Onde:

V1 – Velocidade do vento antes das pás da turbina;

V – Velocidade do vento nas pás da turbina;

V2 – Velocidade do vento após a turbina;

S1 – Secção do tubo antes da turbina;

S – Secção da turbina;

S2 – Secção do tubo depois da turbina.

#### 4.2.2 CURVA DE POTÊNCIA

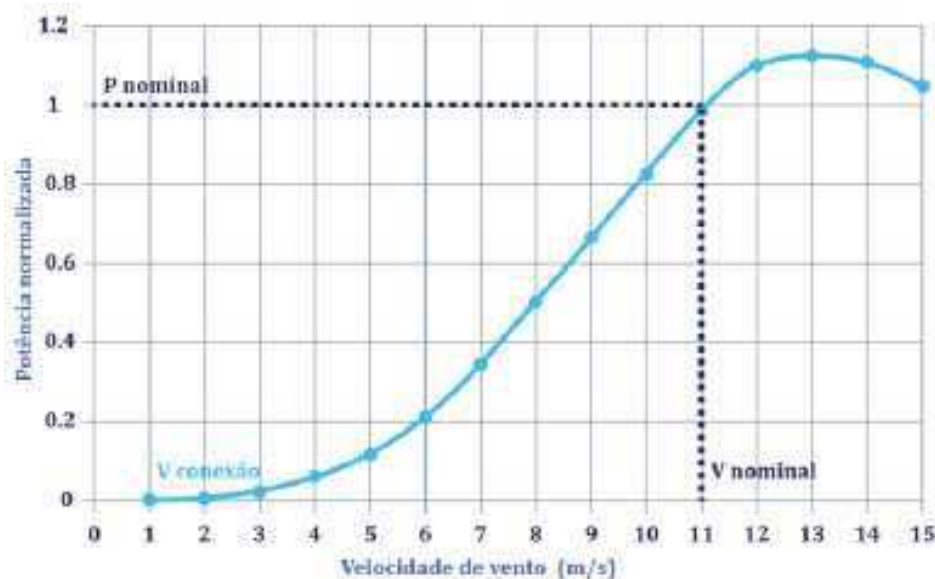
As turbinas eólicas são projetadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade do vento. Esta potência é conhecida como potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida é designada velocidade nominal do vento. Esta velocidade é ajustada de acordo com o regime de ventos no local, sendo habitual encontrar valores entre 12 a 15 m/s.

As especificações exatas da característica do aerogerador, isto é, depende do regime de ventos no local de instalação. Na Figura 13 mostra-se um exemplo de uma característica elétrica, isto é, “potência eléctrica – velocidade do vento”, correspondente a um sistema de conversão de energia eólica.

Devido à lei de variação cúbica da potência com a velocidade do vento, para velocidades abaixo de um certo valor (normalmente, cerca de 5 m/s, mas depende do local) não interessa extrair energia.

Pela mesma razão, para valores superiores à velocidade do vento nominal não é económico aumentar a potência, pois isso obrigaria a robustecer a construção, e, do correspondente aumento no investimento, apenas se tiraria partido durante poucas horas no ano: assim, a turbina é regulada para funcionar a potência constante, provocando-se, artificialmente, uma diminuição no rendimento da conversão. (CASTRO, 2003).

Figura 13 - Curva de Potência de um Aerogerador



Fonte: (ARRIBAS, 2013).

Nessa curva, é possível caracterizar os seguintes valores:

- **Velocidade de conexão ou de arranque.** Valor da velocidade média do vento para que o aerogerador comece a gerar energia elétrica.
- **Velocidade nominal.** Velocidade média do vento a qual uma turbina eólica rende sua potência nominal. Ainda que tradicionalmente não exista um valor de velocidade do vento aceito de forma universal como velocidade nominal, a tendência é usar o valor de 11m/s. Não obstante, convém prestar atenção a este parâmetro nas folhas técnicas do aerogerador, quando se comparam aerogeradores distintos. A partir de esta velocidade de vento os sistemas de controle do aerogerador tratarão de manter a potência de saída de forma regulada.
- **Velocidade de corte ou de desconexão.** Valor da velocidade do vento em que o sistema de controle de uma turbina eólica realiza sua desconexão. A partir desta velocidade do vento o aerogerador permanece



parado e em posição de proteção contra ventos fortes. Esta característica, típica em aerogeradores de grande tamanho, não é tão frequente na mini-eólica. (ARRIBAS, 2013).

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES

Será abordado nessa seção, os dois tipos de aerogerados presentes no mercado, suas características, e quais deles são mais recomendados para aplicações em determinados meios.

#### 4.3.1 AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Os rotores de eixo horizontal se caracterizam por fazer girar suas pás em um plano perpendicular à direção do vento incidente. A velocidade de giro das turbinas de eixo horizontal segue uma relação inversa ao número de suas pás. Assim, as turbinas de eixo horizontal se classificam em turbinas com rotor multi-pá ou aeroturbinas lentas, e com rotor tipo hélice ou aeroturbinas rápidas.

Os rotores multi-pá se caracterizam por ter um número de pás que pode variar de 6 a 24 e, portanto, uma solidez elevada. Apresentam grandes pares de arranque e uma baixa velocidade de giro. A velocidade linear na ponta da pá destas máquinas, em condições de projeto, é da mesma ordem da velocidade do vento. Estas características fazem com que a aplicação fundamental destas turbinas tenha sido tradicionalmente o bombeamento de água. Não são utilizadas em aplicações de geração de energia elétrica devido a seu baixo regime de giro.

Os rotores tipo hélice giram a uma velocidade maior do que os rotores multi-pá. A velocidade linear na ponta da pá destas máquinas varia em uma margem de 6 a 10 vezes a velocidade do vento. Esta propriedade faz com que as aeroturbinas rápidas sejam muito apropriadas para a geração de energia elétrica. Os rotores tipo hélice apresentam um par de arranque reduzido que, na maioria das aplicações, é suficiente para fazer girar o rotor durante o processo de conexão. (ARRIBAS, 2013).

Figura 14 - Aeroerador de Eixo Horizontal



Fonte: (ENERGIA PURA, 2016).

#### 4.3.2 AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL

Dentre as aeroturbinas de eixo vertical, pode-se encontrar três tipos de tecnologias: Savonius, Darrieus e Giromill.

As turbinas com rotores de eixo vertical têm a vantagem fundamental de não precisar de nenhum sistema de orientação ativo para captar a energia do vento. Apresentam a vantagem adicional, com relação às turbinas de eixo horizontal, de dispor do trem de potência e do sistema de geração elétrica a nível do solo, o que facilita muito o trabalho de manutenção. Como principais inconvenientes estão a dificuldade de realizar a regulação de potência ante ventos altos neste tipo de turbinas, a flutuação do par motor no giro da aeroturbina, bem como o menor rendimento do sistema de captação com relação às aeroturbinas de eixo horizontal. Estes inconvenientes quase levaram à extinção dos modelos de eixo vertical. Mas nos últimos anos esta família de aeroeradores experimentou uma ressurreição devido a sua possível utilização urbana, por suas teóricas melhores prestações para ser integrada em edifícios: produz menor nível sonoro, menor

impacto visual, melhor comportamento ante fluxo turbulento. São vários os fabricantes que, diante das boas perspectivas neste campo, aventuraram-se no projeto e fabricação de novos modelos, alguns deles já disponíveis comercialmente. (ARRIBAS, 2013).

Figura 15 - Aerogerador de Eixo Vertical



Fonte: (GLOBO, 2016).

#### 4.4 COMPONENTES DE UM AEROGERADOR DE PEQUENA POTÊNCIA

Será abordado nessa seção, os componentes de compõe um aerogerador de pequena potência, alguns dos componentes que são utilizados na conversão das tensões provenientes dos terminais do gerador e baterias para os padrões adequados a utilização doméstica em baixa tensão.

#### 4.4.1 ROTOR

O rotor é o principal elemento de uma máquina eólica, e tem como função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de eixo rotativo. O rotor é formado do cubo e pás.

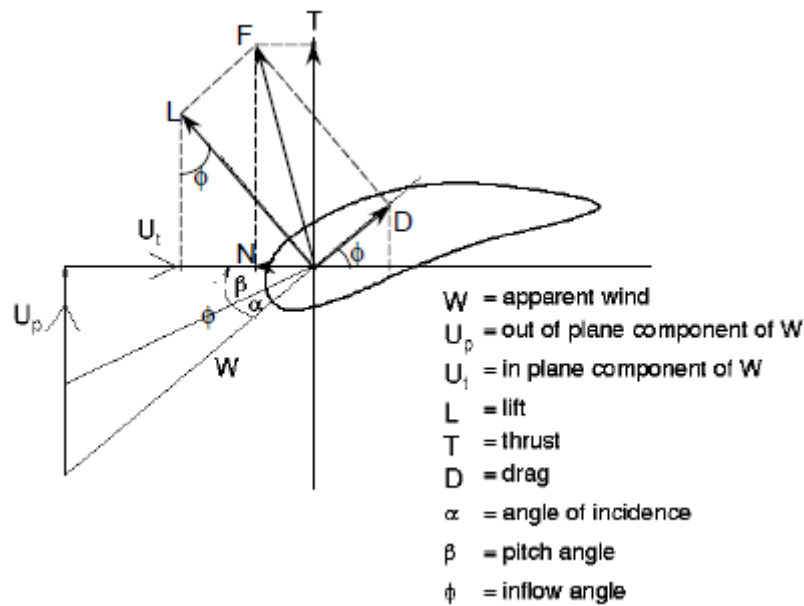
A maior parte dos aerogeradores do mercado são aerogeradores de eixo horizontal a barlavento (o vento chega pela frente); nisto coincidem com os grandes aerogeradores, que são todos a barlavento. A tecnologia utilizada varia de rotores de duas pás, a rotores de 6 pás, cobrindo todas as soluções intermediárias: 3, 4, 5 e 6 pás. (ARRIBAS, 2013).

Define-se *solidez* como sendo a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas mesmas. Se o diâmetro e a solidez das pás forem mantidos constantes, o rendimento aumenta com o número de pás: isto acontece, porque diminuem as chamadas perdas de extremidade.

O acréscimo na energia capturada ao vento está estimado em cerca de 3 a 5% quando se passa de duas para três pás, mas esta percentagem vai-se tornando progressivamente menor à medida que se aumenta o número de pás. Esta razão motivou que a grande maioria das turbinas em operação apresente rotores com três pás, muito embora a solução com duas pás configure benefícios relacionados com a diminuição de peso e de custo. (CASTRO, 2003).

A geometria das pás do rotor, cuja seção reta tem a forma de um perfil alar, determina a quantidade de energia que é extraída a cada velocidade do vento. A Figura 16 ilustra as forças presentes num elemento do perfil alar.

Figura 16 - Sistemas de Forças num Perfil Alar



Fonte: (CASTRO, 2003).

No que corresponde à Figura 16, as grandezas ali descritas são, respectivamente:

- O vetor *velocidade relativa* do vento  $W$  que atua no elemento de pá, resulta de duas componentes: a *velocidade do vento*  $U_p$  e a *velocidade tangencial* da pá  $U_t$ .
- O *ângulo de ataque*  $\alpha$ , definido como sendo o ângulo entre a linha que une os bordos de entrada e de saída do perfil (*linha de corda*) e a velocidade relativa; o *ângulo de passo*  $\beta$ , que é o ângulo entre o plano de rotação da pá e a linha de corda; o *ângulo do escoamento*  $\phi$ , tal que  $\phi = \alpha + \beta$ .
- O vetor *força*  $F$  pode ser decomposto em duas componentes: uma, atuando na mesma direção da velocidade relativa, designa-se por *arrastamento*  $D$ ; outra, é perpendicular e designa-se por *sustentação*  $L$ .
- O vetor força  $F$  pode, igualmente, ser decomposto na direção do plano de rotação e na direção perpendicular, obtendo-se a componente que contribui para o movimento da pá  $N$ , e a componente que contribui para o binário motor  $T$ . (CASTRO, 2003).

#### 4.4.2 CONTROLE DE POTÊNCIA E VELOCIDADE

Existe uma grande variedade de soluções utilizadas para regular a potência e a velocidade de giro nos pequenos aerogeradores. Dentre elas se incluem: (ARRIBAS, 2013).

- **Sem regulação**, na qual o aerogerador é projetado para poder suportar as cargas produzidas em todas as condições de operação, incluídas as velocidades de giro que possam ser apresentadas no funcionamento a vácuo.
- **Regulação por desorientação** na qual o eixo do rotor se desalinha no plano horizontal com relação à direção do vento incidente. Existem distintas soluções para que se produza esta desorientação do rotor, a mais utilizada é através de um desenho em que o centro de impulso do rotor não está alinhado com o centro do rolamento de orientação.
- **Regulação por lançamento**, semelhante ao anterior, mas no qual o desalinhamento ocorre no plano vertical.
- **Regulação por mudança de passo**. A mudança de passo ativa é a solução utilizada nos aerogeradores maiores, mas raramente é usada na mini-eólica, porque na maior parte dos casos se utilizam sistemas de mudança de passo passivos, nos quais a variação do ângulo de ataque das pás se produz através de sistemas centrífugos passivos.
- **Regulação por perda aerodinâmica**, semelhante à utilizada em grandes aerogeradores, consiste em uma redução do coeficiente de potência a partir de certa velocidade de vento, que ocorre pelo comportamento das pás, sem necessidade de atuação externa.

O ponto fundamental na regulação da potência utilizada em pequenos aerogeradores foi tradicionalmente conseguir uma regulação adequada através de sistemas passivos, mecânicos, já que as soluções com mecanismos ativos, elétrico-eletrônicos, semelhantes aos utilizados nos aerogeradores de maior tamanho, ensejam desenhos mais complexos e, conseqüentemente, mais caros e com maior trabalho de manutenção. Por isso esta solução não se costuma usar em mini-eólica. (ARRIBAS, 2013).

#### 4.4.3 SISTEMA DE DIRECIONAMENTO

As máquinas em posição de barlavento necessitam um sistema de orientação que mantenha a máquina alinhada com o vento, enquanto as máquinas orientadas a sota vento e nas que o próprio rotor atua como cata-vento, não necessitam um sistema de orientação.

O sistema de orientação utilizado em grandes aerogeradores é um sistema ativo, em que um sistema eletrônico decide através de um algoritmo de controle quando e quanto girar a gôndola (parte superior do aerogerador, no alto da torre), atuando sobre um ou vários motores, a partir da medida da direção do vento. Pois bem, este sistema é raramente usado na mini-eólica. O principal sistema de orientação para os aerogeradores de pequena potência a barlavento é um sistema passivo, mecânico, denominado “**por cata vento de cauda**”. O leme cata-vento de orientação utilizado é, indistintamente, reto ou elevado (a fim de diminuir a ação do rotor sobre o leme). (ARRIBAS, 2013).

#### 4.4.4 GERADOR

A maioria dos desenhos de pequena potência usam conexão direta entre o rotor do aerogerador e o gerador elétrico, sem existência de caixa de multiplicação, ainda que tenham sido localizados alguns desenhos com uma multiplicadora de duas etapas.

Nos aerogeradores de micropotência (< 3kW) o tipo de gerador utilizado praticamente em todos os desenhos é um alternador de ímãs permanentes (PMG, sigla em inglês) de 4, 6, 8 ou 10 pares de polos. No caso de aerogeradores na gama dos 3-30 kW, ainda que exista uma tendência generalizada ao uso de PMG, também se utiliza a opção de geradores de indução. (ARRIBAS, 2013).

#### 4.4.5 TORRE

A torre é a parte do sistema de geração eólica que eleva o aerogerador para uma altura em que a velocidade do vento é maior e fica menos perturbada pelos efeitos do atrito viscoso e turbulência que ocorrem junto ao solo. A altura da torre é limitada pela relação entre o seu custo e pelo acréscimo da energia obtido com a elevação do rotor.

Com relação ao tipo de torre encontramos uma ampla dispersão, usando-se torres estaiadas e autossustentável, tubulares e de treliça. É prática habitual que o fabricante ofereça diferentes tipos de torres, de acordo com as características do local. O mesmo

ocorre com relação à altura da torre. Assim, encontramos casos em os que o mesmo modelo é oferecido com torres de 6 a 40 metros. (ARRIBAS, 2013).

## 4.5 SISTEMA DE REGULAÇÃO DE POTÊNCIA

Até agora foram comentados sistemas de regulação mecânicos e/ou passivos. Mas também são utilizados sistemas de regulação eletrônicos, ativos, que atuam sobre a geração elétrica na saída do gerador. Por um lado, deve-se considerar que os geradores elétricos utilizados hoje em dia são trifásicos, de tensão e frequência variáveis, enquanto os sistemas aos que serão conectados normalmente demandam abastecimento em alternada (monofásico ou trifásico), sob tensão e frequência estáveis.

### 4.5.1 CONTROLADOR DE CARGA OU REGULADOR DE CARGA

Tem como finalidade controlar a carga das baterias, evitando que sobrecarreguem, o controle da carga corta automaticamente a carga quando as baterias ficam com carga completa, como também a regulação da tensão, para que se mantenha em limites preestabelecidos. Um controle da carga pode ter interruptores de controle manual e pode ter medidores ou luzes para mostrar o estado das baterias no processo carga.

- **Regulação série:** com capacidade para controlar a potência gerada pelo aerogerador, de forma que trabalhe no ponto de máxima potência, ou regulando a geração se o sistema assim requer (como, por exemplo, em um sistema com bateria em que está se encontre plenamente carregada), ou quando se já alcançou e superou a velocidade nominal do aerogerador. (ARRIBAS, 2013).
- **Regulação paralelo:** esta regulação limita a tensão em contínua a um valor estabelecido, derivando em uma **resistência de dissipação** toda a potência excedente. Utiliza-se principalmente para que o aerogerador não fique funcionando no vácuo, quando o sistema não demanda energia. O propósito da resistência de dissipação é eliminar o excesso de energia, convertendo-a em calor. As resistências de dissipação podem ser utilizadas tanto para aquecer água quanto ar, e isto é especialmente



recomendável no caso de aerogeradores de mais de 5 kW, em que a quantidade de energia a dissipar pode ser importante. (ARRIBAS, 2013).

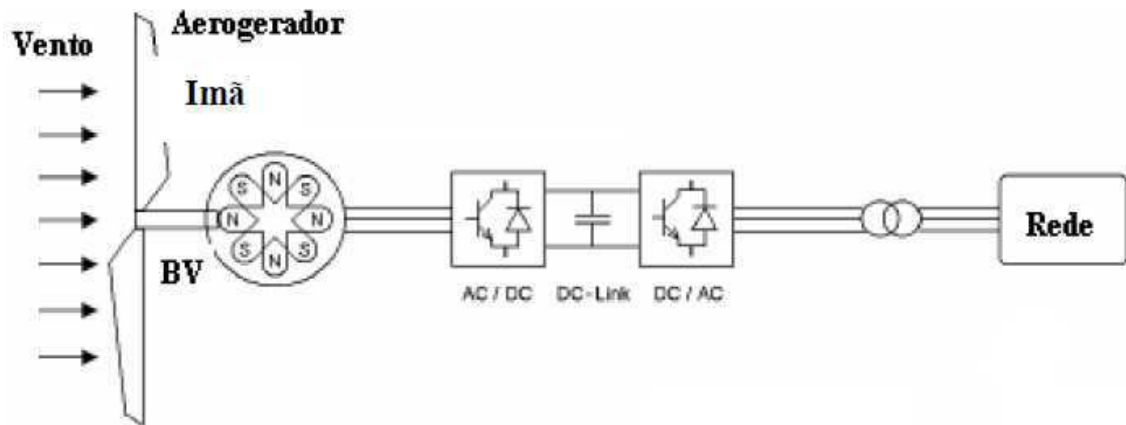
#### 4.5.2 CONVERSORES

Para os conversores são usados dispositivos de eletrônica de potência que possuem elementos de comutação na forma de semicondutores. Os semicondutores podem ser controlados por comutação, no caso os tiristores, transistores bipolares, etc. e também há os dispositivos não controlados, que no caso são os diodos. Os tipos de inversores são usados de acordo com o tipo de trabalho. (PINTO, 2013).

Inversores AC/CC, são retificadores que transformam a corrente alternada em corrente contínua. São dispositivos não controlados formados por diodos arranjados em pontes de diodos e podem ser de saída simples de uma fase ou de saída trifásica; são necessários devido aos vários sinais de frequências variadas que são gerados nos terminais do gerador, devido as diferentes velocidades dos ventos incidentes nas pás do rotor, como também para o carregamento das baterias em tensão CC preestabelecidas.

O Inversor CC/AC, é necessário devido a que os módulos, baterias e a geração da maioria dos pequenos aerogeradores se transforma em energia CC, enquanto que a maioria das aplicações e dispositivos correntes requerem energia AC. Os inversores geralmente são dimensionados de acordo com sua produção de energia contínua máxima. A maioria dos inversores, porém, são capazes de manejar energia adicional ao seu tamanho, mas apenas por curtos períodos de tempo. Esta capacidade de pico é útil para satisfazer as ocasionais subidas de carga, como quando um motor arranca. O inversor é o encarregado de produzir o fornecimento em alternada com a tensão e a frequência requeridas pela aplicação e, portanto, são diferentes para um sistema isolado em comparação com um sistema conectado à rede. (ARRIBAS, 2013).

Figura 17 - Esquema comum de um Aerogerador de Pequena Potência



Fonte: (THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2007).

## 5 NORMATIVA

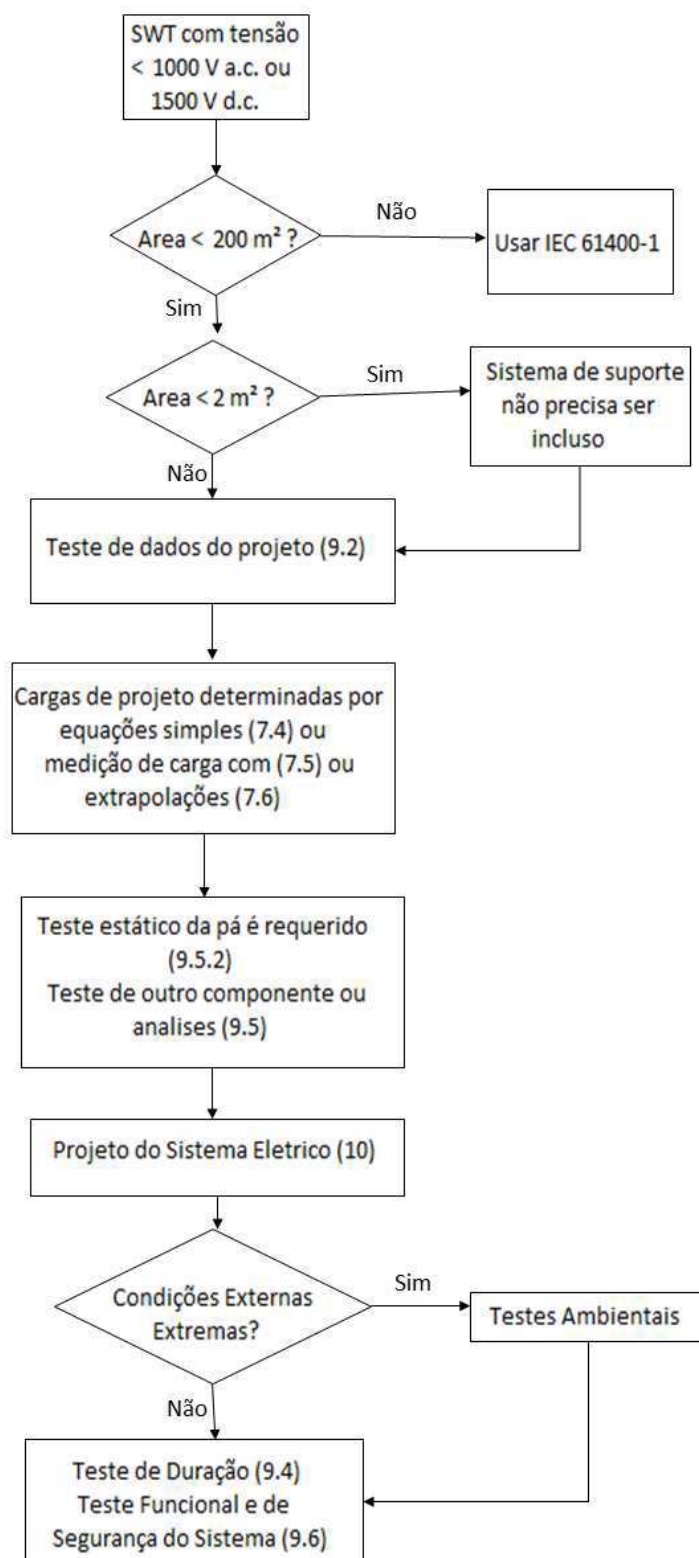
Será abordado neste capítulo, as duas principais normativas, ao menos no que diz respeito ao Brasil, que regulam a microprodução de energia elétrica; a norma IEC 61400-2, que trata do projeto de aerogeradores de pequena potência, na qual fornece todos os procedimentos de cálculo e ensaio dos aerogeradores que serão produzidos, por se tratar de uma norma internacional, a IEC 61400-2 foi incorporada a normas padrões da ABNT; a resolução normativa nº 482, que estabelece o acesso a micro e minigeração de energia para pequenas geradoras e centros de distribuição, estabelecendo a critérios que devem ser seguidos pelo consumidor que quer instalar um pequeno centro de geração de energia, como também os critérios que devem ser seguidos pela distribuidora, no sentido de adequar seu sistema para receber essa geração distribuída, como também o sistema de compensação que será fornecido pela mesma.

### 5.1 NORMA INTERNACIONAL IEC 61400-2

A norma internacional IEC (*International Electrotechnical Commission*) 61400-2, trata dos requisitos de projeto de pequenos aerogeradores, no qual visa garantir a segurança da estrutura, mecânica, elétrica e sistemas de controle dos aerogeradores. Estas especificações se aplicam ao projeto, fabricação, instalação e manutenção do aerogerador, como também ao processo de gestão de qualidade associado ao mesmo.

A norma apresenta todo o método de projeto a ser seguido, simplificado no esquema da figura abaixo:

Figura 18 - IEC 61400-2 Método de Decisão



Fonte: (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61400-2, 2006).

Onde 7.4, 7.5, 7.6, 9.2, 9.4, 9.5, 9.5.2, 9.6 e 10, são as subseções que tratam de como realizar os procedimentos listados.

A seção 7.4 da norma, trata do Modelo Simplificado de Carga para certas configurações de turbina, as cargas podem ser derivadas usando equações simples, que somente podem ser utilizadas para um conjunto limitado de casos. Se as configurações da turbina não atenderem a esses requisitos de configuração, as equações simples não podem ser usadas, devem ser usadas como alternativa a modelagem aeroelastica (7.5) ou de medições de carga (7.6).

As configurações das turbinas que estão aptas ao uso das equações simples, devem atender a todos os seguintes requisitos:

- Eixo horizontal;
- Duas ou mais pás do tipo alar;
- Pás fixas;
- Cubo rígido (não oscilante ou articulado).

A norma fornece várias situações, casos, de carga nos quais estão atreladas equações que podem ser utilizadas para o cálculo e modelagem dessas cargas.

A seção 7.5 da norma, trata da Modelagem por Aeroelasticidade, a aeroelasticidade é o ramo da engenharia aeronáutica que estuda as interações entre forças inerciais, elásticas e aerodinâmicas. Nenhuma estrutura aeronáutica é totalmente rígida e, ao ser exposta a forças aerodinâmicas, normalmente sofre deformações por flexão, torção ou pela combinação destas. Este efeito torna-se relevante quando a turbina se move em alta velocidade, pois qualquer modificação na forma do perfil aerodinâmico, decorrente das forças aerodinâmicas adicionais, causa modificações nas cargas sobre o perfil, aumentando a deflexão no mesmo.

Os casos de projeto de carga são especificados para cada situação de projeto, dependendo das condições do vento, elétricas, ou qualquer outra condição externa. Nos casos de avaliação de cargas, onde uma faixa de velocidade é dada, deve-se avaliar, ao longo de toda a faixa de velocidade do vento, o pior caso de carga.

A seção 7.6 da norma, trata da Modelagem de Carga por Medições, onde o projeto das cargas são derivados de medições de carga, estas medições de carga devem ser tomadas sob condições tão próximas quanto possível aos casos de projeto de cargas descritos na seção 7.5; dessa forma, medições de carga podem ser usadas ao invés de cálculos.

A seção 9 da norma, no qual compreende as seções 9.2, 9.4, 9.5, 9.5.2 e 9.6, trata dos testes disponíveis para pequenos aerogeradores, onde as amostras de teste devem ser representativas da concepção da turbina eólica. Devem ser utilizados instrumentos devidamente calibrados e taxas de amostragem apropriadas.

Os testes devem ser documentados em um relatório contendo uma descrição completa dos métodos de ensaio utilizados, as condições de ensaio, as especificações da máquina testada e os resultados do teste. A descrição do método de ensaio deve incluir uma descrição detalhada dos procedimentos de medição, instrumentação, aquisição de dados e análise de dados. Os desvios relativamente aos métodos descritos na presente cláusula devem ser documentados.

A seção 10 da norma, trata de todo o sistema elétrico associado ao sistema de microgeração, tais quais os dispositivos de proteção, sistema de seccionamento, proteção contra surto, condutores elétricos, etc. O sistema elétrico de um aerogerador, e cada componente elétrico usado no mesmo, como controladores, geradores e afins, devem estar em conformidade com as partes aplicáveis das cláusulas 4 a 15 da IEC 60204-1, normas nacionais, e quaisquer normas locais.

Cada componente elétrico deve ser capaz de suportar todas as condições ambientais previstas no projeto, bem como a mecânica, química e estresse térmico ao qual o componente possa estar sujeito durante a operação.

Cada componente elétrico selecionado, com base em suas características de potência, deve estar apto à exigência do equipamento, tendo em conta os casos de carga projeto, incluindo condições de falha. No entanto, se um componente elétrico, por concepção, não tem as propriedades correspondentes à sua utilização final, pode ser utilizado, desde que seja acompanhado de proteção adicional adequada.

Todos os circuitos do sistema de proteção da turbina que podem ser afetados por um raio ou outras condições de sobretensão transitória, devem ser protegidos de acordo com a IEC 61643-1. Todos os dispositivos de proteção contra surtos usados em aerogeradores de pequena potência, devem estar em conformidade com a IEC 61643-1.

## 5.2 RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 482

Para estabelecer o acesso a microgeração para pequenas geradoras e centros de distribuição que utilizam fontes renováveis de energia elétrica, A ANEEL, publicou a

Norma 482\12, tendo como objetivo diminuir barreiras na conexão de pequenas centrais geradoras e redes de distribuição, a partir desta regulamentação ficaram estabelecidos as condições de acesso.

A norma estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

A norma define microgeração distribuída como sendo uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada e minigeração distribuída como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada.

A norma prevê a instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, visando manter a prestação de serviço adequado de energia elétrica como também aumento de capacidade de distribuição, de confiabilidade do sistema de distribuição, de vida útil ou para conexão de usuários.

Os consumidores, quando não são responsáveis diretos pela geração, e que fazem utilização da energia gerada, são classificados segundo a norma:

VI – empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento;

VII – geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

VIII – autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

No que diz respeito às distribuidoras, estas deverão adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração e minigeração distribuída, utilizando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais. Os custos de eventuais melhorias ou reforços no sistema de distribuição em função exclusivamente da conexão de microgeração distribuída não devem fazer parte do cálculo da participação financeira do consumidor, sendo integralmente arcados pela distribuidora, exceto para o caso de geração compartilhada.

É também de responsabilidade da distribuidora a fiscalização das instalações das centrais geradoras, pois é vedada a divisão de central geradora em unidades de menor porte para se enquadrar nos limites de potência para microgeração ou minigeração distribuída, devendo a distribuidora identificar esses casos, solicitar a readEquação da instalação e, caso não atendido, negar a adesão ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica.

No que se diz ao sistema de compensação de energia fornecido pela concessionária, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses, para o caso de unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, o faturamento deve considerar a energia consumida, deduzidos a energia injetada e eventual crédito de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores, por posto tarifário, quando for o caso, sobre os quais deverão incidir todas as componentes da tarifa em R\$/MWh.

No caso das unidades consumidoras que compartilham de uma mesma unidade geradora, o titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída deve definir o percentual da energia excedente que será destinado a cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica,



podendo solicitar a alteração junto à distribuidora, desde que efetuada por escrito, com antecedência mínima de 60 (sessenta) dias de sua aplicação e, para o caso de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras ou geração compartilhada, acompanhada da cópia de instrumento jurídico que comprove o compromisso de solidariedade entre os integrantes.

Passados os sessenta meses após a data de faturamento, os créditos de energia ativa expiram e o consumidor não terá mais direito sobre eles.

No que compete ao sistema de medição, há diferenças entre a minigeração e a microgeração, onde para microgeração, o sistema de medição é de responsabilidade da distribuidora, já para a minigeração, a responsabilidade é do consumidor, parte interessada.

**Art. 8º** - A distribuidora é responsável técnica e financeiramente pelo sistema de medição para microgeração distribuída, de acordo com as especificações técnicas do PRODIST.

§1º Os custos de adEquação do sistema de medição para a conexão de minigeração distribuída e de geração compartilhada são de responsabilidade do interessado.

§2º Os custos de adEquação a que se refere o §1º correspondem à diferença entre os custos dos componentes do sistema de medição requeridos para o sistema de compensação de energia elétrica e dos componentes do sistema de medição convencional utilizados em unidades consumidoras do mesmo nível de tensão.

**Art. 9º** Após a adEquação do sistema de medição, a distribuidora será responsável pela sua operação e manutenção, incluindo os custos de eventual substituição ou adEquação.

**Art. 10.** A distribuidora deverá adequar o sistema de medição e iniciar o sistema de compensação de energia elétrica dentro do prazo para aprovação do ponto de conexão, conforme procedimentos e prazos estabelecidos na seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST.

### 5.3 COMENTÁRIOS SOBRE CUSTO

Com a regulamentação da geração distribuída, as empresas que atuam no setor de fabricação de componentes têm investido em novas tecnologias para formar um mercado consumidor residencial. No final de agosto de 2014 havia instalado 17 micros e minigeradores conectados à rede de distribuidoras brasileiras, com geração de fonte eólica, segundo dados da Aneel (Agencia Nacional de Energia Elétrica).

É esperado um crescimento da geração distribuída no Brasil, mas um dos obstáculos é o alto custo dos aerogeradores, uma turbina com potência de 2,4 KW, pode custar R\$44,9 mil. De acordo com Rafael Catelli Infantozzi, analista sênior da consultoria norte-americana ICF Internacional, os equipamentos para geração a partir do sol ainda são mais baratos que as turbinas eólicas.

De acordo com o portal Brasil econômico, 2014, no mercado desde 2002, a fabricante brasileira de aerogeradores Enersud projetou e construiu uma turbina vertical, específica para uso em ambientes urbanos, completamente diferente das horizontais utilizadas em áreas rurais. À venda desde o ano passado, o aerogerador vertical já está em operação comercial nos estados do Rio de Janeiro, da Bahia, do Rio Grande do Sul e do Paraná. “Nas cidades, o ambiente eólico é muito turbulento: os ventos estão sempre mudando de direção, o que não acontece com tanta frequência no campo”, explica Luiz Cezar Sampaio Pereira, fundador da Enersud, que atualmente conta com mais de 600 turbinas (entre horizontais e verticais) instaladas no país.

O aerogerador vertical é lento em comparação com uma turbina horizontal, mas extremamente silencioso, característica essencial para a operação em ambiente urbano. O modelo de 1,5kW custa R\$ 14 mil, mas a empresa trabalha numa versão simplificada, de 0,5kW. Menos potente, o equipamento terá um preço mais acessível, que Pereira ainda não divulga. O objetivo é atender principalmente o mercado de telecomunicações, mas também o consumidor doméstico. “Não tenho dúvida que a geração distribuída vai avançar, mas sempre soube que este é um processo lento”, reconhece Pereira. “Assumimos um papel didático. ” Desde 1993 no mercado de microgeração, a distribuidora de equipamentos Energia Pura comercializa tanto painéis solares como aerogeradores, todos importados. “Hoje, o mercado residencial é metade do nosso negócio. Os outros 50% vêm de estabelecimentos comerciais”, conta Eduardo Konze, diretor de Marketing da empresa sediada em Paraty (RJ). O portfólio de produtos da

companhia inclui desde uma turbina eólica de 160 watts (W), para uso em embarcações e locais remotos, até um aerogerador de 10 kW, ao preço de R\$ 418 mil. “Os preços vem baixando constantemente, por conta da evolução tecnológica”, acrescenta Konze, ressaltando que houve crescimento grande no interesse pela microgeração nos últimos cinco anos. Antes de instalar uma turbina eólica ou um painel solar, a empresa faz uma verificação do local onde o equipamento será montado. No caso dos aerogeradores, é necessária uma velocidade mínima para o vento de 16 km/h, em média.

## 6 CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho, permitiu conhecer os fatores que são necessários para que a energia dos ventos seja aproveitada para a geração de energia elétrica através da geração eólica, e também um estudo sobre os componentes usados na geração e os tipos de geradores que são empregados na mesma.

Verificou-se que a participação da energia eólica na matriz energética brasileira vem demonstrando um crescimento grandioso nos últimos anos, aumentando de maneira significativa sua participação a cada ano, e também começa a incentivar empresas, como também consumidores interessados, a investir na autogeração, utilizando a energia eólica para suprir a própria demanda.

A regulamentação da geração distribuída pela resolução 482/2012 da ANEEL e a IEC 61400-2, incentivou as empresas de fabricação de turbinas, componentes para a geração eólica, e seus fornecedores, a investirem em tecnologia, e as concessionárias a criarem normas de interligação para a formação de um mercado consumidor residencial.

Observou-se também, que a implantação do sistema de compensação vinculada a norma 482/12, foi uma evolução para o cenário brasileiro, que pode ser visto como uma forma de incentivo, economia de energia, e claro, também contribuiu com a matriz energética brasileira.

No que diz respeito ao consumidor residencial, as distribuidoras devem estar preparadas para atendê-lo, conforme exigências do PRODIST. Então, para adquirir um sistema eólico para microgeração, deve-se fazer um estudo geográfico e dos ventos analisando a viabilidade da implantação do sistema. Seu custo na implantação do projeto ainda é alto devido aos altos custos dos aerogeradores que, ainda, é um grande obstáculo para a implantação do projeto, mas os investimentos em inovação tecnológica demonstram uma tendência de diminuição destes custos para os próximos anos. Isto mostra a necessidade de estar preparado tecnologicamente para exploração do potencial de energias limpas e renováveis, são elas que irão assegurar o suprimento de energia para que o país possa desenvolver e garantir um futuro melhor para todos.

## BIBLIOGRAFIA

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. *Resolução Normativa Nº 482*. [s.l], 2012.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. *Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica*. [s.l], [s.d].

ARRIBAS, L. *Energia Mini-Eólica*. [s.l], 2013. 59 p.

CASTRO, R.M. *Introdução à Energia Eólica*. 1. ed. [s.l], 2003. 70 p.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas do Potencia Eólico Brasileiro*. Brasília, 2001.

ENERGIA PURA. Aerogerador Air Silent X. Disponível em: <<http://www.energiapura.com/aerogerador-air-silent-x>>. Acesso em 10 de outubro de 2016

FADIGAS, E. *Energia Eólica*. São Paulo: Manoele Ltda, 2011.

GLOBO. Aerogeradores Verticais podem se popularizar nos próximos anos. Disponível em: <<http://redeglobo.globo.com/globouniversidade/noticia/2013/09/aerogeradores-verticais-podem-se-popularizar-nos-proximos-anos.html>>. Acesso em 11 de outubro.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61400-2: Wind turbines - Part 2: Design Requirements for Small Wind Turbines*. Geneva, 2006.

PINTO, M. *Fundamentos da Energia Eólica*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. *Environmental Impacts of Wind Energy Projects*. USA, 2007.

UNIVERSIDADE DO MILHO. Limite de Betz. Disponível em: <<http://microeolica.weebly.com/limite-de-betz.html>>. Acesso em 10 de outubro de 2016.

WINDFINDER. Estatística de Vento e Condições Atmosféricas. Disponível em: <[https://www.windfinder.com/windstatistics/campina\\_grande\\_aeroporto](https://www.windfinder.com/windstatistics/campina_grande_aeroporto)>. Acesso em 19 de setembro de 2016.

