

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

JEAN SHOJI TSUNA

**LIMITES DIMENSIONAIS DE
SISTEMAS DE GERAÇÃO - AEROGERADORES**

JOINVILLE/SC

2016

JEAN SHOJI TSUNA

**LIMITES DIMENSIONAIS DE
SISTEMAS DE GERAÇÃO - AEROGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial na obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Adalberto de Araújo Barreto Filho

JOINVILLE/SC

2016

JEAN SHOJI TSUNA

**LIMITES DIMENSIONAIS DE
SISTEMAS DE GERAÇÃO - AEROGERADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do estado de Santa Catarina
– Centro de Ciências Tecnológicas – Bacharelado em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora

Orientador: Adalberto de Araújo Barreto Filho
IES de origem: UDESC (Universidade do Estado de Santa Catarina)
Titulação: Doutor

Membro: Fernando Buzzulini Prioste
IES de origem: UDESC (Universidade do Estado de Santa Catarina)
Titulação: Doutor

Membro: Laís Hauck de Oliveira
IES de origem: UDESC (Universidade do Estado de Santa Catarina)
Titulação: Graduada

JOINVILLE/SC

2016

Dedico este trabalho
ao meu pai Márcio, e
aos meus avós paternos
Taiji e Rosa (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Márcio Tsuna, que sempre acreditou em mim e fez de tudo para a minha formação.

Ao meu avô Taiji Tsuna, pelo apoio incondicional. Em especial a minha avó, Rosa Tsuna, falecida em 2013, pela dedicação que fez grande diferença na minha vida.

A Universidade Estadual de Santa Catarina - UDESC, na qual adquiri experiência e conhecimento.

Ao Prof. Dr. Adalberto de Araújo Barreto Filho, pela oportunidade e apoio na elaboração do trabalho.

Aos amigos que sempre torceram por mim nesta etapa.

RESUMO

Diante dos potenciais já prospectados e inventariados de energias renováveis alternativas do país, e de uma diversificação ainda incipiente dos usos destes energéticos, constata-se que o crescimento de sua participação vem orientando o planejamento energético em face o necessário crescimento da demanda suprida por estas fontes na matriz energética nacional - sobretudo, no que diz respeito à energia eólica. Para o Brasil, que dispõe de consideráveis recursos energéticos renováveis, tais como os da geração eólica, que recentemente, tem ganhado destaque crescente, é interessante dispor de uma análise criteriosa para especificação do correto dimensionamento das turbinas eólicas. Desta forma, como se propõe neste trabalho, busca-se caracterizar o melhor aproveitamento, identificando o dimensionamento adequado das unidades aerogeradoras, de forma a se obter a maior eficiência energética em seus usos, considerando tanto os aspectos tecnológicos, custos-índices, bem como maiores benefícios socioambientais.

Palavras-chave: *Energia Eólica. Aerogeradores. Limites de Aerogeradores.*

ABSTRACT

Faced with the already prospected and inventoried potentials on the country, with an incipient diversification of the uses of these energy sources, which has been guiding the energy planning for the necessary growth of the participation of these sources in the national energy matrix - above all, with respect to wind energy. In Brazil, which has considerable renewable energy resources, such as those of wind power, which has recently gained increasing importance, it is interesting to have a careful analysis to specify the correct design of wind turbines. In this way, as it is proposed in this work, it is sought to characterize the best use, identifying the adequate design of the wind turbine units, in order to obtain the highest energy efficiency in its uses, considering both the technological aspects, cost-indices as well as greater socio-environmental benefits.

Key-words: *Wind Energy, Limits of Wind Turbine.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacidade Anual Instalada no Mundo.....	20		
Figura 2 - Evolução da capacidade Acumulada e Instalada	20		
Figura 3 - Comportamento do vento sob influência das características do terreno	22		
Figura 4 - Perfil do vento da superfície até a altura onde ocorre a predominância de vento horizontal.....	23		
Figura 5 – Classificação da rugosidade das superfícies.....	26		
Figura 6 – Efeitos na velocidade, potência e turbulência do vento a jusante de uma edificação.....	27		
Figura 7 - escoamento em torno de uma colina.....	28		
Figura 8 - Função da densidade de probabilidade de Weibull com variação nos fatores de forma.....	30		
Figura 9 - Representação da rosa dos ventos.....	32		
Figura 10 - Cilindro de área transversal.....	34		
Figura 11 – Extração da energia do vento por uma turbina eólica.....	35		
Figura 12 - Curva ideal de C_p em função de v_3/v_1	38		
Figura 13 - Rotor Darrieus	Figura 14 - Rotor Savonius	40	
Figura 15 - Turbina de eixo horizontal		40	
Figura 16 - Incidência do vento quanto à posição do rotor.....		41	
Figura 17 - Coeficiente de potência em relação à velocidade específica de vários aerogeradores.....		43	
Figura 18 – Comparação do nível de ruído sonoro de algumas fontes.....		46	
Figura 19 – Evolução dos aerogeradores		51	
Figura 20 - Efeito esteira em um parque eólico.....		56	
Figura 21 - Localização das usinas eólicas existentes e futuras no Brasil		59	
Figura 22 - Fábricas de componentes eólicos de grande porte no Brasil		60	
Figura 23 - Expansão do SIN para integração da energia eólica nas regiões NE-SE ..		62	
Figura 24 - Custos de equipamentos informados pelos leilões		63	
Figura 25 - Repartição dos custos dos empreendimentos eólicos de 2015		64	
Figura 26 - Evolução dos principais custos dos empreendimentos eólicos.....		64	
Figura 27 - Curvas de potência representativas das máquinas comercializadas do Rio Grande do Sul.....		71	
Figura 28 - Aerogeradores de pequeno porte em centros urbanos		74	
Figura 29- Turbina de eixo vertical sobre o telhado.....		75	
Figura 30 - Colapso da turbina de uma torre		76	
Figura 31 - Fortis Montana	Figura 32 - WES Tulypo	78	
Figura 33 - Turby	Figura 34 - WindSide	Figura 35 - Ropatec	79
Figura 36 – WindWall	Figura 37 - Energy Ball		79
Figura 38 - Número de conexões por fonte.....			83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de atrito n para diferentes tipos de terrenos	24
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos tipos de turbinas	42
Tabela 3 - Estimativa anual dos casos de mortalidade por atividades humanas	48
Tabela 4 - Aerogeradores no mercado brasileiro 2009 e 2015.....	58
Tabela 5 - Valores do fator de capacidade vencedores do leilão	66
Tabela 6 - Custos de energia no Leilão em Novembro de 2014	67
Tabela 7 – Parâmetros básicos para classes de turbinas eólicas.....	67
Tabela 8 - Classes de turbinas dos parques vencedores dos leilões entre 2010 e 2015	68
Tabela 9 - Usinas eólicas no Brasil	70
Tabela 10 - Tarifas de preços de energia dos APP em diversos países.....	78
Tabela 11 - Custos de alguns modelos de turbinas.....	80
Tabela 12 - Dados para velocidade do vento de 12 m/s.....	81
Tabela 13 - Dados para velocidade do vento de 5,5 m/s.....	81
Tabela 14 - Principais barreiras encontradas no mercado americano	87

LISTA DE ABREVIATURAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Aerogerador de Pequeno Porte
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
DOE	Department of Energy
DWIA	Guided Tour on Wind Energy
EWEA	Europe Wind Energy Association
IDEAL	Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América latina
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
USDA	Departamento de Agricultura e de Desenvolvimento Rural
WINEUR	Wind Energy Integration in the Urban Environment
WWEA	Small Wind World Report Summary

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 PROBLEMA	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1. Objetivos Gerais.....	15
1.3.2. Objetivos Específicos	15
1.4. HIPÓTESES	16
1.5 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	16
1.6 DESENVOLVIMENTO	17
1.7 CONCLUSÃO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 A ENERGIA EÓLICA.....	19
2.2 A FONTE EÓLICA.....	21
2.2.1 Rugosidade do terreno.....	22
2.2.2 Obstáculos	26
2.2.3 Orografia	28
2.2.4 Caracterização do regime de vento.....	29
2.2.5 Ferramentas Computacionais	32
2.2.6 Energia e potência contida nos ventos.....	34
2.3.1 Turbinas de Eixo Vertical	39
2.3.2 Turbinas de Eixo Horizontal	40
2.4.1 Impacto Visual.....	44
2.4.2 Ocupação de terra.....	45
2.4.4 Impacto nas aves	47
2.4.5 Impacto de Interferência Eletromagnética.....	49
2.5 LIMITES SUPERIORES – MAIORES AEROGERADORES.....	50
2.5.1 Prospecção tecnológica	50
2.5.2 Estruturação de projetos eólicos	52
2.5.3 Condições restritivas	54
2.5.4 Otimização da produção de energia	55
2.5.5 Carregamento do Aerogerador	56
2.5.6 Desafios logísticos	58
2.5.7 A importância do Sistema Interligado Nacional (SIN)	61

2.5.8	Avaliação econômica no Brasil	62
2.5.9	Aspectos técnicos	67
2.6	LIMITES INFERIORES – MENORES AEROGERADORES.....	72
2.6.1	A geração distribuída	72
2.6.2	Definição de um aerogerador de pequeno porte (APP)	73
2.6.3	Tecnologia e aplicações.....	74
2.6.4	Custos Índices.....	77
2.6.7	O mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil	82
2.6.8	O mercado de energia eólica de pequeno porte nos EUA	85
3.	DISCUSSÃO.....	90
4.	CONCLUSÃO	92
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1. INTRODUÇÃO

No contexto nacional e mundial, a energia eólica de grande porte tem crescido de forma exponencial, marcadamente nos últimos anos. Este fato é consequência da necessidade de diminuir a geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis e gerar energia através de fontes que não emitam gases de efeito estufa. Dentre as fontes limpas, neste momento, a energia eólica é a que mais se destaca.

A geração eólica é considerada uma fonte de baixo impacto ambiental. Porém, existem fatores ambientais que não devem ser desconsiderados. Os limites dimensionais dos aerogeradores de grande porte, em termos de tamanho estrutural e de potência, não foram alcançados. No entanto, devem ser observadas as variáveis que interferem na escolha dos modelos e as questões que podem impedir o projeto.

No que diz respeito à geração distribuída, o país tem grande vocação para a disponibilidade para exploração de fontes de energia elétrica, no entanto, se atrasa em despertar para o uso, como a eólica e a fotovoltaica. Entender o setor elétrico no Brasil nem sempre é trivial, em particular a geração eólica de pequeno porte. É necessário analisar as questões técnicas, políticas e econômicas para entender os critérios necessários do projeto eólico.

1.1 PROBLEMA

Apesar da tecnologia eólica ter crescido significativamente desde os seus primórdios até os dias de hoje, a potência gerada por suas maiores unidades geradoras (aerogeradores), hoje disponível para a instalação nacional, ainda é relativamente pequena, quando comparada às usinas hidrelétricas ou térmicas de grande ou médio porte. Em razão disto, torna-se indispensável analisar as características técnicas que definem o

dimensionamento, em projeto, da instalação destes energéticos – em termos da potência de cada unidade aerogeradora, seja em geração distribuída ou em grandes parques eólicos. Diante do que, cabe considerar como proposta deste trabalho, a definição de quais seriam os principais parâmetros e critérios utilizados no dimensionamento destas unidades, para o suprimento energético eficiente social e ambientalmente. De outra forma, qual a dimensão – em termos de potência disponibilizada – para as unidades de geração eólica, em correspondência com a fonte (vento) disponível em localidades típicas (dentre as que são consideradas como aproveitamentos eólicos viáveis) de maior eficiência. Quais os limites, inferior e superior, em termos de kW, para as unidades destes energéticos e quais as potências típicas adequadas para as diferentes configurações de instalações de aerogeradores.

1.2 JUSTIFICATIVA

As políticas de planejamento energético brasileiro vêm incentivando a geração baseada em fontes renováveis, diversificando a matriz incentivada por força de determinantes econômicos e ambientais. A energia eólica tem ganhado destaque, sobretudo no que diz respeito aos grandes parques eólicos – enquanto a microgeração, seja como geração para auto-consumo, ou sob a forma de sistemas energéticos distribuídos e interligados no sistema de distribuição, ainda não alcançou uma participação minimamente significativa no rol dos sistemas eólico-energéticos em operação no país.

Em boa parte do espaço físico brasileiro a energia eólica tem uma sazonalidade complementar à energia hidrelétrica, visto que os períodos de melhor condição de vento coincidem com os de menor capacidade dos reservatórios – o que ocorre, por exemplo, na região nordeste do Brasil. A integração dos dois tipos de energia poderia conferir mais confiabilidade na continuidade do suprimento, bem como na estabilidade na rede do Sistema Interligado Nacional, SIN, o que contribui para a manutenção da participação das energias renováveis na matriz energética nacional – reduzindo, por exemplo, a necessidade de implementação de usinas termoelétricas.

Este trabalho procura fazer uma análise do potencial das diferentes modalidades de sistemas eólicos, considerando, sobretudo, os limites de capacidade, entre os maiores e os menores disponibilizados pela tecnologia, para a implantação dos sistemas eólico-energéticos, com o intuito de prospectar os diferentes potenciais energéticos em conformidade com a disponibilidade da fonte – o regime de ventos – considerando os aspectos técnico-econômico e financeiros indispensáveis para definição da viabilidade, em termos do melhor aproveitamento desse energético.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral é avaliar os principais parâmetros que proporcionam condições para a instalação dos aerogeradores nas regiões do Brasil.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudar aspectos geográficos que influenciam a implantação dos aerogeradores.
- Observar o potencial eólico de cada região, através de estudos já realizados.
- Analisar a viabilidade técnica e econômica para pequenos e grandes empreendimentos eólicos.

1.4. HIPÓTESES

A expansão e diversificação da exploração da energia Eólico-elétrica, concomitante com os avanços tecnológicos nos sistemas aerogeradores tem propiciado o surgimento de grande número de modelos destes geradores, tanto no limite superior de sua capacidade, como também, no limite inferior - enquanto ganhos de eficiência e flexibilidade de usos, para fins de geração em grande escala, assim como na viabilidade da micro-geração. A máxima eficiência destas máquinas ainda não chegou ao limite. Como também, ainda não se definiu um limite teórico máximo dimensional para as maiores unidades de aerogeradores. Porém, confrontado com o que até então vem se realizando com a tecnologia disponível, constatado através dos estudos e levantamentos realizados pelas instituições de pesquisa e meios técnicos, é possível realizar um tabelamento dos principais modelos, até então hoje existentes, instalados para os diferentes regimes típicos de ventos nas regiões propícias à exploração deste energético no Brasil.

Desse modo, é possível se chegar a algumas constatações merecedoras de consideração, no que diz respeito aos critérios de definição de modelos e de dimensionamento dos aerogeradores mais eficientes, para cada região geográfica ou regime de ventos explorável disponível.

1.5 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Este trabalho se constituiu em pesquisas bibliográficas, por intermédio do qual se realizou um levantamento parcial, porém significativamente consistente, de estudos dos aerogeradores de grande e pequeno porte. Foi necessário caracterizar os principais fatores que interferem a produção eólica, proporcionando assim, um melhor entendimento do tema. Para encontrar os limites dimensionais, fez-se necessário utilizar dados realísticos encontrados em publicações, tendo como base uma estimativa da faixa de potência mais utilizada.

1.6 DESENVOLVIMENTO

Primeiramente é desenvolvida a fundamentação teórica do trabalho, possibilitando uma melhor compreensão de como os aerogeradores se desenvolveram, levantando seus aspectos técnicos e fatores que influenciam os limites de sua implantação. São abordadas teorias como o Limite de Betz, que é o limite máximo que uma turbina tem de converter a energia cinética para energia mecânica. Além disso, discutiu-se sobre os tipos de pás que a tecnologia atual utiliza na fabricação dos aerogeradores.

Através da abordagem os aspectos técnicos, verifica-se a evolução dos grandes aerogeradores e nota-se um grande crescimento, tanto em tamanho físico quanto em potencial energético. Porém, mesmo a tecnologia ter crescido expressivamente, é necessário ter conhecimento de que os limites ainda não foram alcançados, e o potencial de geração cresce continuamente.

É analisada a aplicação para implementação de diferentes tipos de aerogeradores, quais são os fatores que influenciam no dimensionamento das turbinas eólicas para o melhor aproveitamento, levando em consideração características tecnológicas, geográficas, dos regimes dos ventos e econômicas.

Os dados, de constantes levantamentos e estudos realizados, encontrados em artigos, dissertações de mestrado e trabalhos de conclusão de curso, auxiliam ao aprofundamento do tema, proporcionando maior complementaridade para o estudo do potencial eólico.

1.7 CONCLUSÃO

Na conclusão, correspondente à parte final do trabalho, são expostos os pontos mais importantes que caracterizam a implantação dos aerogeradores. Verificando e confirmando a consistência das hipóteses que foram levantadas, constatando, por conseguinte, os principais critérios que são usados na definição dos modelos, bem como o dimensionamento, para alguns das principais usinas (parques) eólicas do país, assim como as respectivas relevâncias e implicações do uso destes critérios, em termos da definição da viabilidade, eficiência e economicidade referentes à exploração eólico-energética, o que vem a constituir o principal aspecto do tema apresentado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

São apresentados neste Capítulo os principais conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do trabalho, dando o suporte para os estudos, análise e reflexões. Assim, poderão ser formulados os conceitos envolvidos nos resultados.

2.1 A ENERGIA EÓLICA

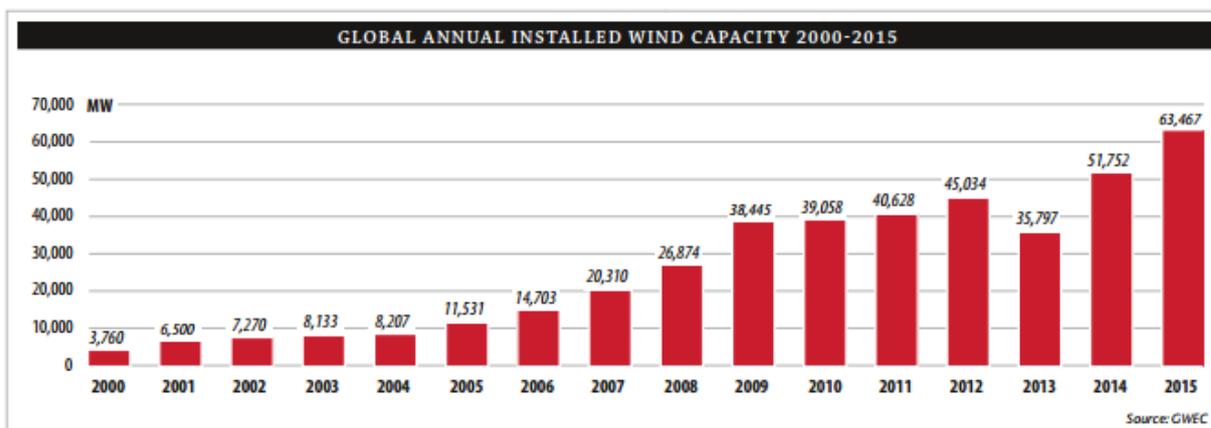
O aproveitamento dos recursos dos ventos teve origem na antiguidade. Desde máquinas de eixo vertical, que eram usadas para moer grãos, assim como o desenvolvimento de moinhos para o bombeamento de água.

No final do século XIX, começou-se a estudar as máquinas eólicas para a produção de energia elétrica. Porém o crescimento desta tecnologia ocorreu devido a uma grande preocupação para a produção de energia na década de 70, por causa das fontes de combustíveis fósseis serem limitadas, como também o seu impacto ao meio ambiente. O problema teve maior evidência com a crise do petróleo de 1973 e 1979, e a criação de um modelo sustentável para a população com grande demanda de energia torna-se necessário.

O uso da energia eólica em larga escala só começou nos anos 1980, pois houve uma queda relevante do kWh, ocorrido devido ao desenvolvimento tecnológico, à economia de geração em alta escala, o que levou o aumento da capacidade unitária dos aerogeradores.

Na primeira década do século XXI, a energia eólica consolida-se na matriz energética de diversos países, com o crescimento exponencial da capacidade instalada nos cinco continentes. No fim de 2015, a potência acumulada no mundo alcançou 433 GW, um aumento de 17% em comparação ao ano anterior. Na Figura 1, é mostrada a capacidade das novas usinas de energia eólica concluídas ao longo de 2015, atingindo cerca de 63,5 GW (GWEC, 2016).

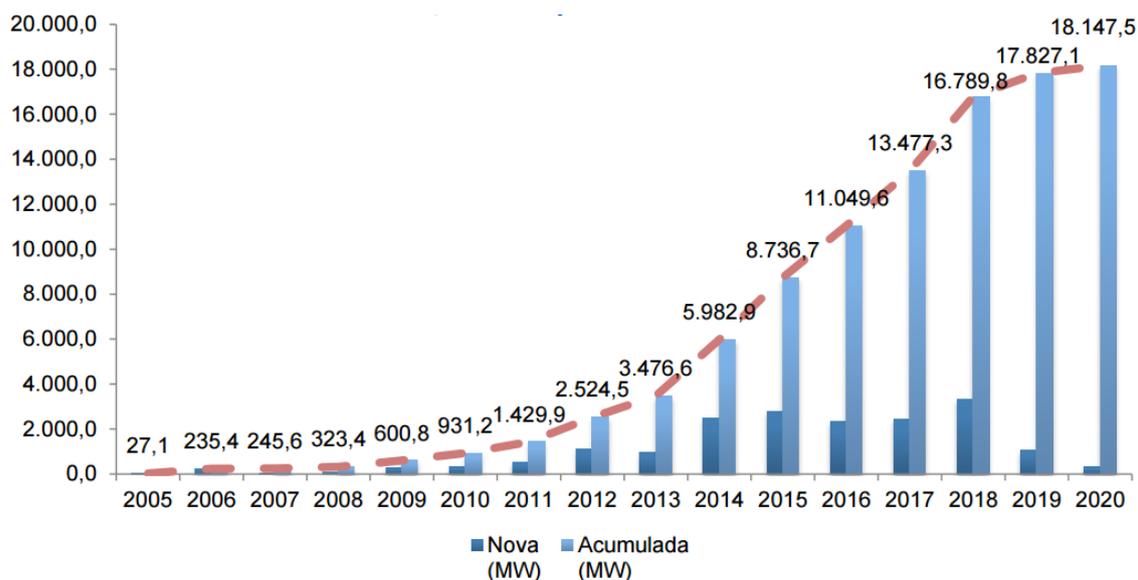
Figura 1 - Capacidade Anual Instalada no Mundo



Fonte: GWEC, 2016

O Brasil foi responsável por aproximadamente 2,7 GW dos 63,5 GW acrescentados no fim de 2015 (GWEC, 2016). Mesmo tendo uma participação pequena no setor eólico mundial, o seu crescimento foi expressivo nos últimos anos, além disso, estima-se uma grande expansão deste potencial nos anos que virão pela frente (Figura 2).

Figura 2 - Evolução da capacidade Acumulada e Instalada



Fonte: ABEEólica, 2016

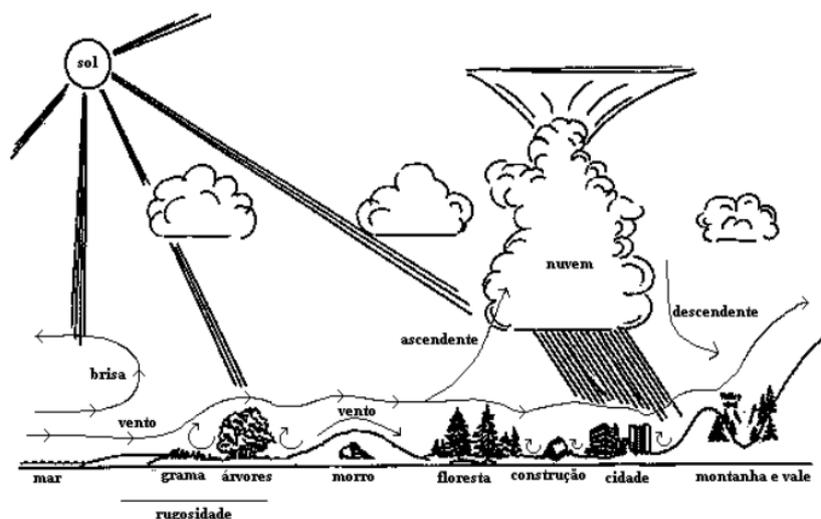
Diante da evolução e crescimento da disponibilidade deste energético, houve a significativa evolução nas tecnologias e nos empreendimentos envolvidos. E, no intuito de identificar e avaliar os critérios tais como viabilidade, economia e exploração energética, que serão levantados os pontos mais relevantes para implantação dos aerogeradores.

2.2 A FONTE EÓLICA

A energia eólica é uma fonte oriunda da incidência de energia solar. A formação dos ventos se inicia através da radiação ultrapassando a atmosfera. Com aquecimento desuniforme dos gases, provoca o deslocamento da massa de ar e ocorrem variações nas pressões atmosféricas em diferentes regiões que tentam se equilibrar, o que proporciona sistemas de convecção em todo o globo terrestre.

Os movimentos dos ventos também sofrem influência da rotação da terra, assim como características topográficas, diferenças de altitudes, rugosidades, presença de obstáculos nas redondezas, relevo que pode causar variação da aceleração do vento (DUTRA, 2007). A Figura 3 representa de forma simples o comportamento do vento sob influências da região. O movimento horizontal da massa de ar é chamado de vento, que é paralelo à superfície do planeta. O movimento vertical é chamado de turbulência. O movimento horizontal (vento) é essencial para gerar energia eólica.

Figura 3 - Comportamento do vento sob influência das características do terreno



Fonte: Atlas eólico do Brasil, 1998.

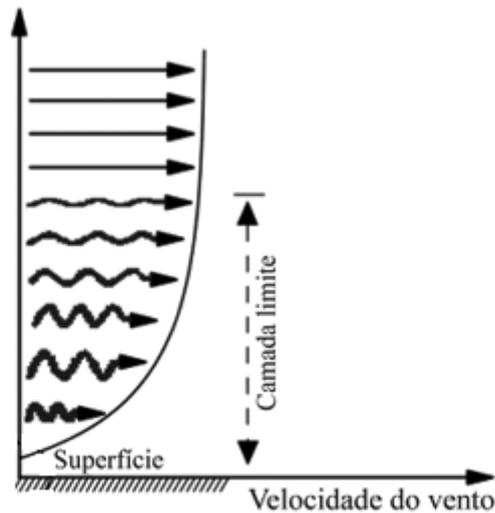
2.2.1 Rugosidade do terreno

A rugosidade, que está ligada às características do relevo da superfície, se trata das irregularidades ou variações da superfície da terra, é amplamente utilizada para estudos preliminares em cada região. A importância de conhecer a rugosidade para determinar a altura em que será instalado o aerogerador.

Além da rugosidade, outro aspecto deve ser considerado, que é a *Camada limite*. Para a definição de *Camada limite*, foi mencionado que a massa de ar se deslocando na horizontal considera-se como vento, enquanto o deslocamento no sentido vertical não é considerado vento, e sim uma turbulência. A *Camada limite* é uma delimitação que divide as áreas onde vão ocorrer movimentos de turbulência e predominância de vento.

A *Camada limite* pode variar dependendo das características do tipo do terreno (mar, litoral, floresta), é justamente na altura acima desta camada que será instalado o aerogerador. Então abaixo do aerogerador, ocorrerá maior presença de turbulência, e acima do aerogerador terá maior ocorrência de vento. A turbina eólica é projetada na altura que ocorra maior predominância do ar se deslocando na horizontal. A Figura 4 mostra a representação da camada limite.

Figura 4 - Perfil do vento da superfície até a altura onde ocorre a predominância de vento horizontal



Fonte: Adaptado de MARTINS, GUARNIERI e PEREIRA, 2008.

Retornando ao conceito de rugosidade, a expressão matemática é representada pela *Lei de Potência* para se obter a velocidade do vento em uma altura desejada, expressa por:

$$V(z) = V(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^n \quad (1)$$

Onde:

$V(z)$ é a velocidade que corresponde a altura desejada z

$V(z_{ref})$ é a velocidade que corresponde a altura de referência z_{ref}

z é a altura desejada

z_{ref} é a altura de referência

n é o coeficiente de atrito

O valor de n sob certas condições é igual à $n = 1/7$, sendo uma aproximação geralmente utilizada para terrenos abertos. A Tabela 1 apresenta valores do coeficiente de atrito.

Tabela 1 – Coeficiente de atrito n para diferentes tipos de terrenos

Características do terreno	Coeficiente de atrito
Calma superfície aquática ou solo suave	0,10
Gramma alta ao nível do solo	0,15
Arbustos e cercas	0,20
Áreas rurais com muitas árvores	0,25
Pequenas cidades com árvores e arbustos	0,30
Grandes cidades com prédios elevados	0,40

Fonte: Pinto, 2013

A *Lei da Potência* é um modelo mais simples, resultado de estudos da camada limite sobre uma placa plana. Esse modelo apresenta uma vantagem pela sua fácil utilização, entretanto, os resultados obtidos não possuem precisão adequada (DUTRA, 2007).

Existe outro método chamado *Lei Logarítmica*, sendo um modelo com mais complexo que relaciona as velocidades dos ventos em duas alturas.

$$V(z) = V(z_{ref}) \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right] \quad (2)$$

Onde:

$V(z)$ é a velocidade que corresponde a altura desejada z

$V(z_{ref})$ é a velocidade que corresponde a altura de referência z_{ref}

z é a altura de desejada

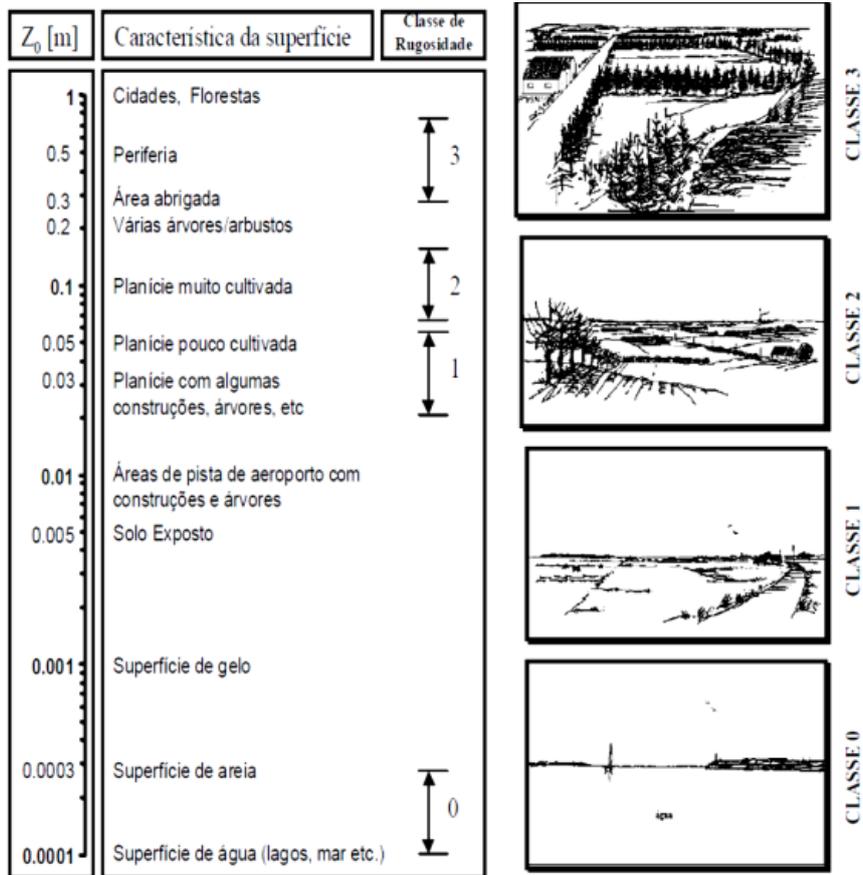
z_{ref} é a altura de referência

z_0 é o comprimento de rugosidade do terreno

O comprimento de rugosidade deve ser compreendido como uma variável climática, ou seja, uma região pode ter valores distintos com variações climáticas, pois muda de acordo com o tipo de vegetação, nível do mar, presença de neve, etc.

Quanto maior o comprimento de rugosidade, mais energia está sendo retirada do vento próximo à superfície. Isso implica que a velocidade do vento ao longo do perfil vertical se altera com o tipo de cobertura da terra. Do ponto de vista prático, isso influencia na velocidade média do vento na altura do rotor das turbinas eólicas e, conseqüentemente, na quantidade de energia que poderá ser extraída, constituindo assim, um parâmetro de relevância para a viabilidade dos empreendimentos (ATLAS EÓLICO: BAHIA, 2013). A Figura 5 mostra o comprimento de rugosidade de acordo com as características da superfície.

Figura 5 – Classificação da rugosidade das superfícies



Fonte: (MORTENSEN, 1993 e TROEN, 1989)

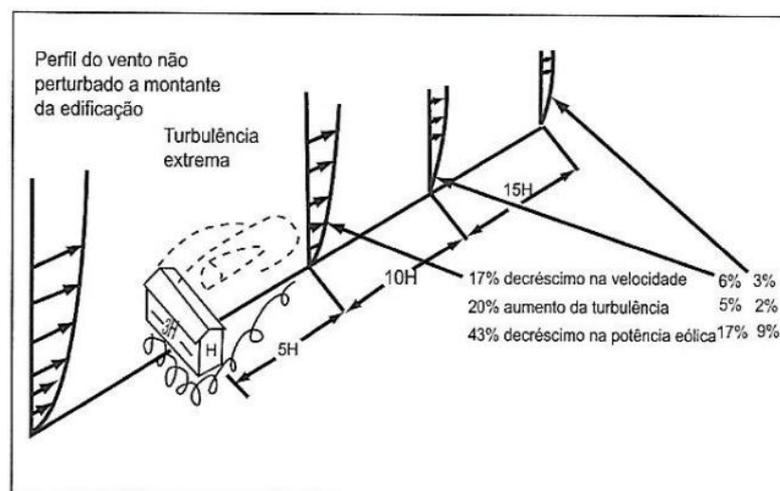
2.2.2 Obstáculos

Os obstáculos definem-se como elementos que produzem o *efeito de sombreamento*, na qual influenciam na redução da velocidade e potência do vento, assim como a distribuição do perfil de escoamento. Existem fatores importantes a serem analisados, como dimensões, posicionamento e porosidade do obstáculo. Podem ser considerados obstáculos elementos como edifícios, árvores, morros, entre outros.

A porosidade de árvores, por exemplo, varia com a queda das folhas, função do clima nas diferentes estações do ano. Para obstáculos construídos pelo homem, é comum representá-lo com uma caixa retangular, bem como considerar o fluxo como sendo bidimensional (FADIGAS, 2012).

A Figura 6 apresenta resultados obtidos em estudos por (MANWELL, 2004), exemplificando o que ocorre com o vento quando passa por obstáculos. O perfil de vento, à primeira esquerda, apresenta sem perturbação. Quando ele passa pelo obstáculo, que neste exemplo é uma casa, o vento sofre perturbação e perde a velocidade e ocorre o aumento da turbulência. Constatase nesta figura, que somente após uma considerável distância, o perfil do vento retorna às condições iniciais.

Figura 6 – Efeitos na velocidade, potência e turbulência do vento a jusante de uma edificação

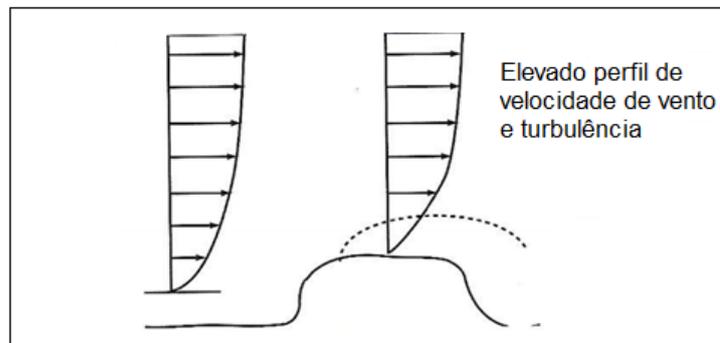


Fonte: FADIGAS, 2012.

2.2.3 Orografia

A orografia está associada às variações de altura do relevo de uma superfície, tendo uma influência significativa no comportamento dos ventos. Caracteriza-se por presença de colinas, vales, gargantas ou depressões. A Figura 7 mostra o escoamento do vento em uma colina, com variação no perfil do vento e na turbulência.

Figura 7 - Escoamento em torno de uma colina



Fonte: FÁDIGAS, 2012.

Geralmente são utilizadas curvas de nível para descrever o relevo do terreno. Com o auxílio de programas computacionais, torna-se mais detalhada a análise orográfica.

Com o avanço dos modelos de escoamento e a crescente velocidade do processamento dos computadores, os resultados mostram-se cada vez mais acessíveis e confiáveis uma vez que, atualmente, não é necessário o uso de supercomputadores para se obter dados com nível de precisão aceitável para análises do comportamento da velocidade do vento em um determinado terreno (DUTRA, 2007).

2.2.4 Caracterização do regime de vento

Os ventos apresentam comportamentos estocásticos, a velocidade do vento tem um padrão de comportamento ao longo do ano. Para um estudo do potencial eólico, são instaladas estações de medição para coletar dados e conhecer as variações da velocidade do vento, em geral, o período de medição é de alguns anos.

Os dados obtidos de atlas eólicos fornecem uma boa estimativa do potencial eólico, porém, não são dados precisos para serem usados em um projeto de instalação de uma central (FADIGAS, 2012). Dessa forma, torna-se necessária a instalação de estações meteorológicas no local de interesse.

Um estudo preliminar de uma região através de parâmetros estatísticos é útil para estimar turbinas eólicas ou comparar o potencial com outras regiões, Existe o método da função de probabilidade de Weibull, sendo uma ferramenta computacional para tratar os dados do padrão de comportamento da velocidade do vento.

A distribuição de Weibull é o método mais utilizado para se realizar o tratamento estatístico de histogramas relativos ao comportamento dos ventos além, também, de ser amplamente utilizado pela maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia. (SILVA, 1999. ARAÚJO, 1989; ROHATGI, 1994; TROEN, 1989; FERREIRA, 2000).

A função da densidade de probabilidade de Weibull é expressa por:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Onde:

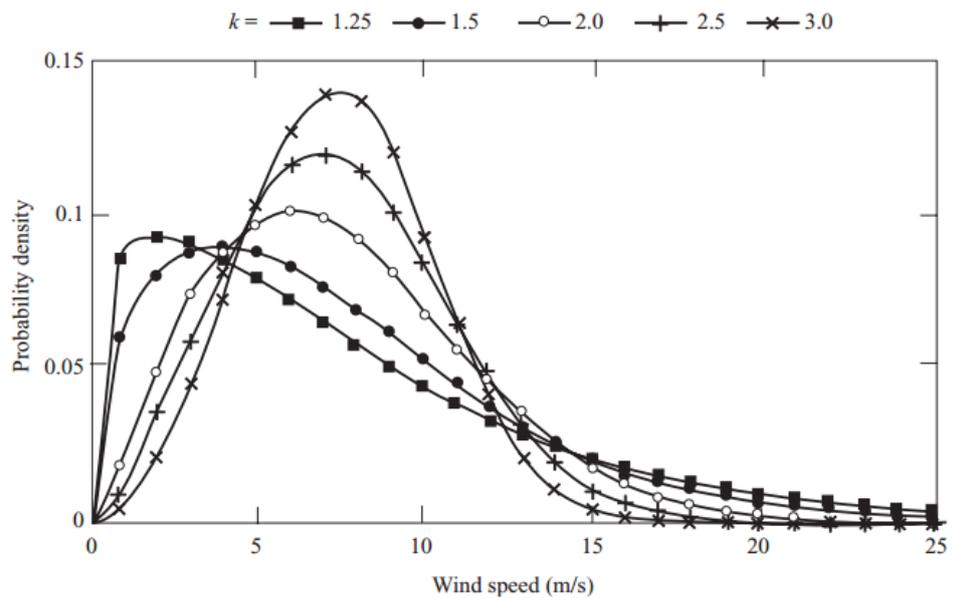
k é o fator de forma;

c é o fator de escala (adimensional);

v é a velocidade do vento.

O fator de escala c está relacionado com o valor da velocidade média, o fator de forma k é responsável por mudar o formato da função, ele fornece a representação da distribuição do vento. A Figura 8 mostra a função da distribuição de Weibull variando os valores de k .

Figura 8 - Função da densidade de probabilidade de Weibull com variação nos fatores de forma



Fonte: BURTON, 2001.

Outra ferramenta utilizada como representação estatística do regime dos ventos é a Distribuição de Rayleigh, apresenta na seguinte expressão:

$$f(v) = \frac{2}{c} \left(\frac{v}{c}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4)$$

Onde:

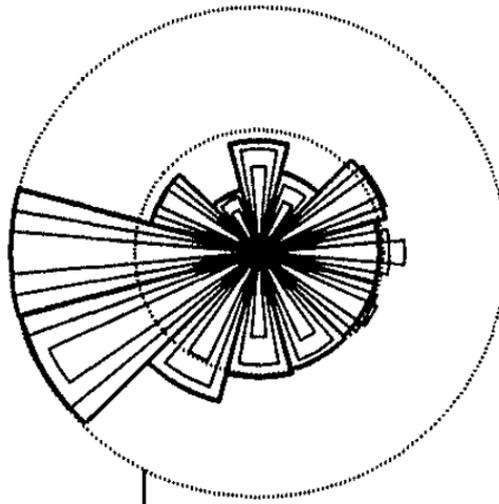
c é o fator de escala (adimensional);

v é a velocidade do vento.

A Distribuição de Rayleigh caracteriza-se apenas pelo fator de escala c , enquanto a Distribuição de Weibull utiliza dois fatores (k e c). Um caso particular ocorre se o fator de forma de Weibull for igual a 2, assim a expressão torna-se igual à de Rayleigh. De acordo com (ELETROSUL, 2014), a Distribuição de Weibull é mais abrangente, apresenta melhor aderência às estatísticas de velocidade do vento, por isso, é mais utilizado.

A Rosa dos Ventos é um auxílio para identificar a direção a ser instalada as turbinas eólicas. Representa um diagrama que mostra como a velocidade e a direção dos ventos estão tipicamente distribuídas. A Figura 9 mostra uma representação gráfica da rosa dos ventos. O maior comprimento da linha indica a direção onde os ventos são mais frequentes, é importante ressaltar que a presença de obstáculos na direção onde a incidência de ventos é maior influencia no projeto eólico.

Figura 9 - Representação da rosa dos ventos



Fonte: TROEN, 1989.

2.2.5 Ferramentas Computacionais

Devido ao comportamento não previsível dos ventos, diversos softwares são utilizados para auxiliar o planejamento dos projetos eólicos. Cada um deles possui uma aplicação específica, como o *Open Wind*, utilizado para calcular a produção e viabilidade econômica, podendo ser aplicado também à produção de energia solar; o *RETscreen* foi desenvolvido para avaliar o potencial eólico em terrenos complexos; o *Windfarmer* traz módulos sobre as características das turbinas, estatísticas do vento, dados de turbulência, visualização, otimização e aspectos financeiros. Segue uma descrição de outros dois softwares conhecidos (PINTO, 2013).

a) WAsP – Wind Atlas Analysis and Application Program

Desenvolvido nos anos 80 na Dinamarca, possui mais de 3500 usuários de 110 países e territórios. As principais funções deste programa são:

- Estimar e otimizar a eficiência e a produção de parques eólicos;
- Mapear os recursos eólicos;
- Digitalizar dados nos mapas (como contornos de altura, por exemplo).

O WAsP calcula o potencial eólico de uma dada área. Ele recebe dados como orografia, rugosidade, obstáculos e dados de velocidade do vento. No caso extremo de não possui estes dados, a solução é optar pelo cálculo de comprimento de rugosidade do terreno. Ao se conhecer o comportamento acima da camada limite, pode-se presumir que ele tenha comportamento semelhante em outra área da mesma região, visto que as características são parecidas.

b) WindPRO

Este programa foi desenvolvido na Dinamarca, mais de 1800 companhias e instituições utilizam o WindPRO, pode ser aplicado para:

- Digitalizar dados nos mapas (como contornos de altura, por exemplo);
- Calcular a geração de ruídos e sombras;
- Fazer fotomontagens da paisagem-terreno com as turbinas eólicas;
- Estimar a energia de uma única turbina ou único parque eólico;
- Calcular as perdas devido ao efeito esteira (seção 2.5.5).

O WindPRO é popular por ter uma interface relativamente simples e ser dividida em módulos, como exemplo a versão 2.7: a) Energia, b) Meio ambiente, c) Visual, d) Energia e e) Economia.

2.2.6 Energia e potência contida nos ventos

A energia cinética do vento é dada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

Onde:

m é a massa da partícula de ar [kg];

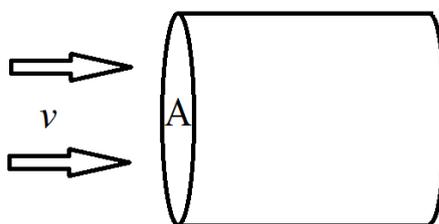
v é a velocidade do ar [m/s].

A potência é dada pela energia sobre um intervalo de tempo:

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (6)$$

Para mensurar a potência proveniente do vento, é necessário de um modelo que leva em consideração o fluxo de ar passando por um cilindro de área transversal (Figura 10).

Figura 10 - Cilindro de área transversal



Determina-se que a potência do vento passando transversalmente pelo cilindro é dada por:

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

Onde:

ρ é a massa específica do vento

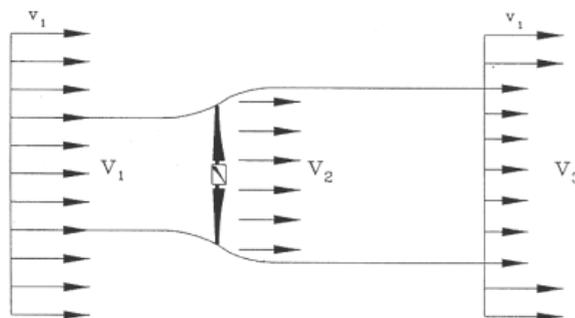
A é a área transversal varrida pelas pás eólicas

v é a velocidade do vento

O rotor do aerogerador entra em movimento quando o deslocamento do vento atinge as pás, ocorrendo a conversão de energia cinética do vento para energia mecânica do rotor. A potência dos ventos não está disponível em sua totalidade, existe um limite para a conversão da energia elétrica. Para dar um significado físico, é denominado um índice chamado coeficiente de potência C_p , pode ser entendido com a eficiência do rotor.

O limite de potência que pode ser extraída do vento foi determinada pelo físico alemão Albert Betz, ele considerou uma massa de ar entrando em um cilindro com um conjunto de pás (Figura 11).

Figura 11 – Extração da energia do vento por uma turbina eólica.



Fonte: DUTRA, 2007.

Onde:

V_1 é a velocidade do vento entrando no cilindro;

V_2 é a velocidade do vento através do rotor;

V_3 é a velocidade do vento saindo do cilindro.

Betz assume que fluxo de ar é constante em todas as regiões do cilindro. De acordo com a lei da continuidade de fluxo, temos que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (8)$$

Para encontrar o limite de Betz, devem ser consideradas duas situações extremas:

- A velocidade de entrada é igual a velocidade de saída ($v_1 = v_3$), neste caso a potência é nula ($P = 0$).
- A velocidade de saída se reduz a zero ($v_3 = 0$), neste caso não existe fluxo de ar saindo da turbina, conseqüentemente a potência é zero ($P = 0$).

A potência extraída aquela que será retirada do vento, sendo a diferença entre a potência retirada do rotor e a potência de saída:

$$P_{ext} = P_1 - P_3 \quad (9)$$

Aplicando a Equação (5) na expressão (7):

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_3 v_3^3) \quad (10)$$

Substituindo a Equação (6) na Equação (8), temos que:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_3^2) \quad (11)$$

O fluxo de massa torna-se:

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 \quad (12)$$

Onde:

\dot{m} é a massa de ar por segundo (fluxo de massa).

Ou,

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2) \quad (13)$$

Assume-se que a velocidade do vento através do rotor (v_2) é a média da velocidade de entrada com a velocidade de saída (*Teorema de Rankine-Froude*):

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (14)$$

Substituindo as expressões (9) e (10) na expressão (8):

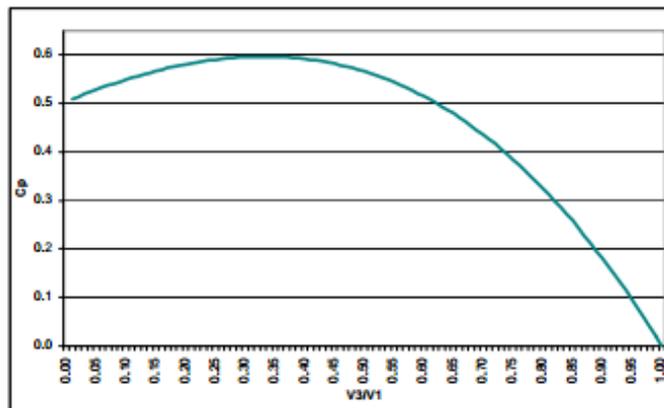
$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (15)$$

Em que:

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (16)$$

O coeficiente de potência é denominado como C_p , ao plotar o gráfico da relação de C_p com a razão das velocidades v_3/v_1 , é obtido que o valor de pico de C_p é de 0,593 (Figura 12).

Figura 12 - Curva ideal de C_p em função de v_3/v_1 .



Fonte: DUTRA, 2007.

O valor de $v_3/v_1 = 1/3$ é considerado para o caso ideal:

$$C_{p(Betz)} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (17)$$

O máximo valor que o rotor pode retirar da potência do vento é de 59,3%. Em casos práticos, o valor de C_p é menor do que o valor teórico devido às influências aerodinâmicas das pás e do rotor. Em condições favoráveis de operação, ele varia de 0,45 a 0,50 (PINTO, 2013).

2.3 AS TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas são máquinas que absorvem a energia cinética do vento e convertem em energia mecânica, em seguida é transformada em energia elétrica.

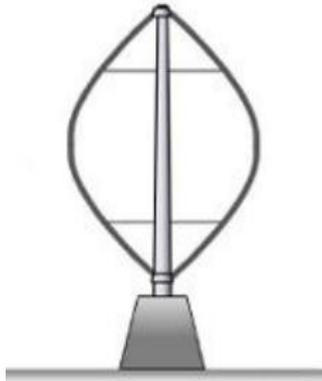
Elas classificam-se entre turbinas de *eixo horizontal* e as de *eixo vertical*, serão estudados os dois tipos de aerogeradores. O objetivo desta seção é apresentar a tecnológica e suas principais características.

2.3.1 Turbinas de Eixo Vertical

As turbinas de Eixo Vertical apresentam a vantagem de gerar energia sem necessitarem de sistemas de controle para o ajuste das pás ou do rotor. A instalação se torna menos complexa, podendo ser implementada em áreas urbanas. O custo de manutenção é reduzido devido aos seus compartimentos estarem contidos no solo. A principal desvantagem está na redução da capacidade de geração, por estarem próximos do solo, estão sujeitas a ventos com velocidades menores. Como a potência disponível do vento aumenta com o cubo da velocidade deste, é essencial que se instale as pás em alturas mais elevadas. Ventos em locais de baixas alturas não são somente fracos, como também turbulentos, o que aumenta o esforço e fadiga da turbina de eixo vertical. Além disso, os ventos em centros urbanos sopram com maior turbulência e menor constância.

Os modelos de eixo vertical também podem ser classificados por turbinas por força de sustentação, como Darrieus (Figuras 13), turbinas por força de arrasto, como o rotor Savounius (Figura 14). O modelo de *Darrieus* é o mais desenvolvido dentre essas turbinas, possui normalmente duas ou três pás, a caixa de engrenagens encontram-se ao solo.

Figura 13 - Rotor Darrieus



Fonte: EPE, 2016.

Figura 14 - Rotor Savonius



Fonte: EPE, 2016

2.3.2 Turbinas de Eixo Horizontal

São turbinas que predominam no uso da tecnologia eólica elétrica, devido à possibilidade de alcançar alto potencial de geração. Necessita de um sistema mais complexo de equipamentos e o custo é maior do que os aerogeradores de eixo vertical, porém, essas características são compensadas com o melhor rendimento aerodinâmico que oferece (Figura 13)

Figura 15 - Turbina de eixo horizontal



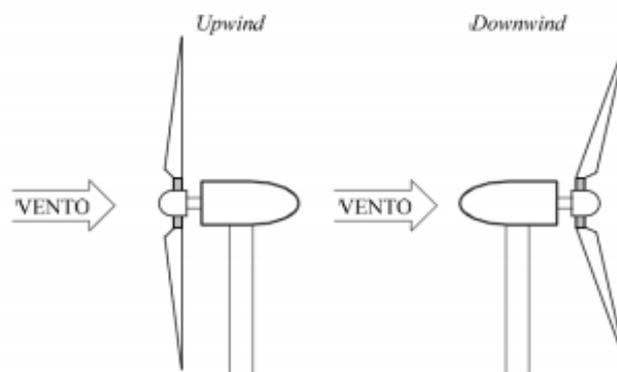
Fonte: EPE, 2016.

As pás necessitam de um sistema que controle a potência, pois existem os problemas de manter a velocidade constante, ou limitar a potência na ocorrência de ventos em alta velocidade e diferentes direções.

A orientação do rotor influencia no projeto dos aerogeradores. As máquinas *downwind* (Figura 14.b), em que o vento incide na parte de trás da turbina, orientam-se automaticamente na direção dos ventos, porém causam vibrações nas pás o que ocasiona na sua flexão, ocorrendo também o aumento do ruído e redução da potência de saída. Por outro lado, as turbinas *upwind* (Figura 16.a), onde o vento incide na parte da frente da turbina, necessitam de um mecanismos com maior complexidade para a orientação do rotor com o fluxo do vento, mas essas máquinas operam mais suavemente, oferecendo maior potência.

Figura 16 - Incidência do vento quanto à posição do rotor

(a) upwind e (b) donwind



Fonte: MARQUES, 2004.

A quantidade de pás é um fator que influencia no desempenho do aerogerador. Os rotores podem conter uma ou várias pás. Existem diversas vantagens e desvantagens em relação à quantidade de pás. Diante da junção de todos os fatores, as turbinas de três pás são as mais aceitas comercialmente, devido ao compromisso entre a eficiência aerodinâmica, custo, velocidade de rotação, peso, estabilidade e ruído (ANEEL, 2016).

A Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens dos três tipos de aerogeradores: Eixo Horizontal, Eixo Vertical por força de sustentação e Eixo Vertical por força de Arrasto.

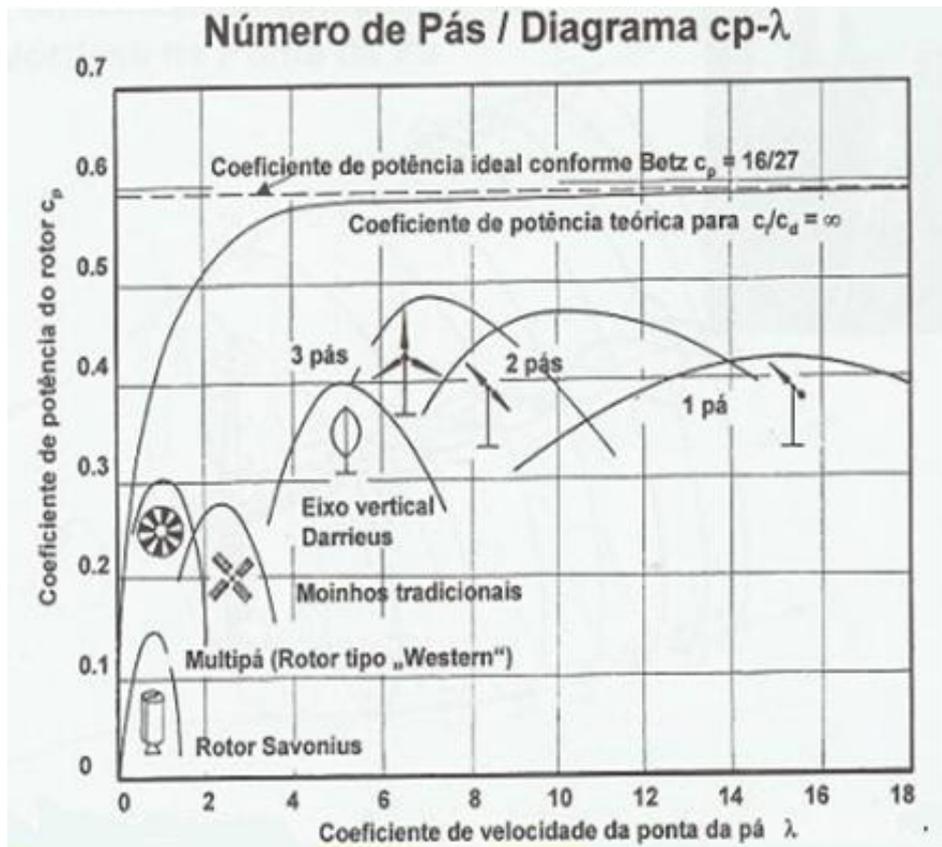
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos tipos de turbinas

	Turbina de Eixo Hozontal	Turbina de Eixo Vertical por força de sustenção	Turbina de Eixo Vertical por força de Arrasto
Vantagens	1. Eficiência	1. Bastante eficiente	1. Comprovada no mercado (globalmente)
	2. Comprovada no mercado	2. Independe da direção do vento	2. Silencioso
	3. Largamente Utilizada	3. Menos sensível à turbulência do que as turbinas de eixo horizontal	3. Robustez
	4. Mais econômico	4. Produz menos vibrações	4. Independe da direção do vento
	5. Vários modelos disponíveis		5. Produz menos vibrações
Desvantagens	1. Não se adapta bem com frequentes mudanças de direção do vento	1. Ainda não é difundido comercialmente	1. Não é eficiente
	2. Não lida bem com oscilações irregulares de vento (turbulências)	2. Mais sensível à turbulência do que as turbinas verticais de força de arrasto	2. Não econômico comparado aos demais tipos de turbinas

Fonte: WINEUR, 2005.

A Figura 17 apresenta a curva do coeficiente de potência em relação a velocidade de ponta para diversos tipos de aerogeradores. As turbinas eólicas tem capacidades diferentes de extrair potência do vento, como citado na seção 2.5.1, as turbinas de três pás possuem coeficiente de potência entre 0,40 e 0,50, somente em casos ideais o coeficiente de potência do rotor chegaria à 0,593.

Figura 17 - Coeficiente de potência em relação à velocidade específica de vários aerogeradores



Fonte: DEWI, 2001.

2.3.3 Material das Pás

As pás são componentes de complexa fabricação e alto grau de exigência. A sua tecnologia teve grandes evoluções ao longo dos últimos vinte anos, e os modelos foram baseados na engenharia aeroespacial. As técnicas de construção são atribuídas a processos que devem satisfazer os seguintes critérios, melhoria do desempenho, minimização dos custos e probabilidade de defeitos – elevada resistência à fadiga, alta rigidez, resistência a relâmpagos ou temperaturas.

Existem diversos materiais que podem ser utilizados para a fabricação, tais como fibra de vidro, alumínio, madeira, resinas de polímeros ou materiais compostos. Atualmente, utilizam-se estruturas de fibra de vidro e resina epóxi, a junção desses dois materiais proporcionam alta rigidez e leveza para as pás.

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

A energia eólica também pode produzir impactos ambientais, apesar de não estarem relacionados à emissão de gases ou resíduos. Em geral, os benefícios ambientais da energia eólica são calculados pelas emissões evitadas de outras fontes (PINTO, 2013). Serão apresentados os tipos de impactos ambientais que estes equipamentos podem provocar.

2.4.1 Impacto Visual

O impacto visual influencia visibilidade de paisagens, através das cores, quantidade e o tamanho dos aerogeradores.

Uma forma de diminuir o impacto visual é pintar os aerogeradores com a mesma cor da paisagem local. A rotação das pás juntamente com a incidência solar gera sombra e pode causar desconforto aos residentes do local, a distância dos aerogeradores é um fator que não pode ser desconsiderado. Na Alemanha e na França, a distância mínima é de 500m (PINTO, 2013).

2.4.2 Ocupação de terra

Os impactos relacionados às diversidades biológicas são fatores ambientais importantes. A deterioração contínua dos habitats naturais e o crescente número de espécies selvagens que estão ameaçadas levou aos governos a necessidade de proteger o meio ambiente.

Segundo (MONTEZANO, 2012), o Brasil possui diversas áreas protegidas consideradas ricas em biodiversidade e beleza cênica, essas áreas são denominadas Unidades de Conservação (UC). Existe uma divisão entre essas unidades: Proteção Integral e Uso Sustentável. Em áreas de Proteção Integral, é impossibilitado o desenvolvimento de projetos eólicos. Em Proteção Sustentável, com a avaliação juntamente com órgãos envolvidos, a possibilidade de realizar empreendimentos eólicos que estejam de acordo com as características ambientais.

O European Wind Energy Association, EWEA (EWEA. 2009) cita um estudo desenvolvido pelo governo escocês, analisando as influências dos parques eólicos na indústria turística e revisaram diversos estudos vindos da Europa, Estados Unidos e Austrália. Chegou-se nas seguintes conclusões:

- a) A grande oposição ocorre na etapa de planejamento;
- b) Grande número de pessoas pensam que a beleza cênica é perdida com a implantação dos parques eólicos, porém, para outras pessoas, os parques eólicos ajudam para a estética paisagística;
- c) Com o passar do tempo, as turbinas eólicas são mais aceitas;
- d) De forma geral, não existe evidências que indique sérios impactos negativos para o turismo;
- e) Para o planejamento do impacto turístico, sugere-se uma declaração, informando a análise dos fluxos de turistas nas estradas e o número de habitantes próximos às regiões sofram influência do impacto visual.

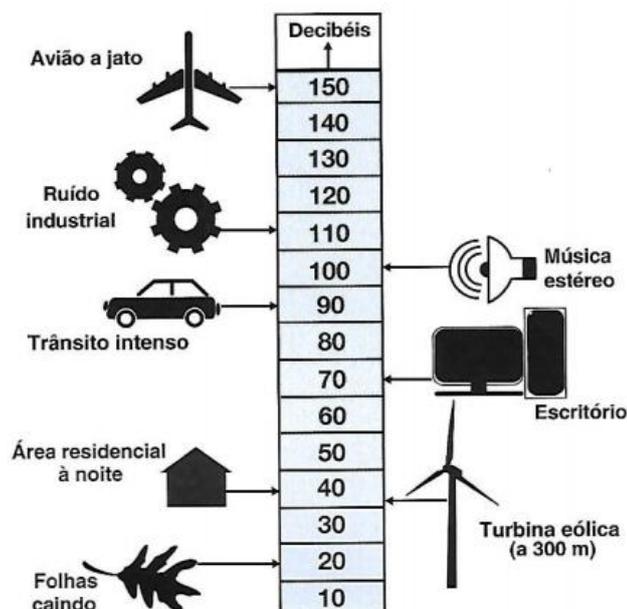
2.4.3 Emissão de Ruído

A produção de ruído de operação das turbinas pode gerar incômodo aos residentes próximos, isto tem sido significativamente, apesar de seu baixo nível, ainda é uma restrição a ser considerada.

A emissão de ruído é caracterizada por duas componentes: o ruído mecânico e o ruído aerodinâmico. O primeiro é gerado pela maquinaria do aerogerador, como caixa de engrenagens e o gerador. O segundo é causado pela interação das pás com o vento. De acordo com (MONTEZANO, 2012), os aerogeradores modernos tem praticamente eliminado o ruído mecânico, devido ao isolamento acústico da necele, dessa forma, o ruído aerodinâmico é o que mais contribui para a emissão sonora. Segundo (EWEA, 2009), a redução do ruído aerodinâmico tem sido melhorada diminuindo a velocidade de rotação dos aerogeradores e o uso do controle de passo.

Um parque eólico apresenta um nível de ruído próximo de 40 dB a uma distância de 300 m (Figura 18), equivalente a uma área residencial à noite. Dependendo da distância das turbinas, torna-se um ambiente silencioso para os residentes próximos.

Figura 18 – Comparação do nível de ruído sonoro de algumas fontes



Fonte: PINTO, 2013.

A maioria dos parques eólicos se encontra em áreas rurais, em que o barulho de fundo costuma ser baixo, especialmente durante a noite. Os aerogeradores tendem a ficar em regiões com velocidades de vento elevadas, onde o ruído do vento é maior que o produzido pelas máquinas, podendo cobrir o som emitido pelos aerogeradores (EWEA, 2009).

No Brasil não existe uma lei que defina o limite de ruído permitido, porém existem leis que determinam estes valores que variam com o horário. Essas leis podem mudar dependendo do estado, os horários noturnos (22h - 7h), em zonas residenciais, estão na faixa de 65 a 70 decibéis.

De acordo com (MONTEZANO, 2012), as experiências relatadas por outros países, indicam que o ruído das turbinas eólicas, em grande maioria, é reduzido consideravelmente. O impacto do ruído pode ser atenuado com a instalação dos parques em distâncias consideráveis.

2.4.4 Impacto nas aves

A estrutura da torre e o movimento de rotação das pás nos aerogeradores podem afetar os pássaros. De acordo com EWEA (EWEA, 2009), é difícil encontrar uma razão única e clara sobre os impactos, a energia eólica pode representar riscos para os pássaros de várias maneiras:

- a) Os impactos são muito dependentes dos sítios como: o layout do parque, a topografia da paisagem, a estação do ano, as espécies dos pássaros e a direção migratória;
- b) Os impactos variam muito dependendo da espécie dos pássaros.

Os tipos de riscos que podem afetar os pássaros são (EWEA, 2009):

- a) Colisão com as pás e torres, causando morte ou ferimentos;
- b) Desequilíbrio no habitat. A presença das turbinas eólicas e os trabalhos de manutenção podem deslocar as aves de seus habitats, acarretando na reprodução reduzida das aves;
- c) Interferência na locomoção das aves entre alimentação, abrigo no inverno e reprodução, podendo resultar em voos adicionais que demandam mais energia dos pássaros; e
- d) Redução ou perda do habitat disponível.

Os maiores fatores que causam a mortalidade dos pássaros por colisão são, a topografia da área, a direção e as forças dos ventos locais, as características do projeto e a distribuição dos aerogeradores no local. No início de um projeto deve-se avaliar o local a ser realizada a instalação das turbinas eólicas. Cada projeto deve conter um estudo detalhado do comportamento das aves, dos ventos e da topografia no local específico. Estas informações devem favorecer a minimização das colisões de pássaros com as turbinas (EWEA, 2009).

De acordo com (EWEA, 2009), admite-se que muitos parques eólicos apresentam baixas taxas de mortalidade por colisão. No entanto, mesmo que a taxa de mortalidade por colisões seja baixa, este é um fator a ser considerado. A Tabela 3 mostra um estudo comparativo das causas de mortalidade das aves por atividades humanas.

Tabela 3 - Estimativa anual dos casos de mortalidade por atividades humanas

Causas	Estimativa de Mortalidade Anual
Edificações/ Janelas	550 milhões
Gatos	100 milhões
Linhas de alta tensão	130 milhões
Veículos	80 milhões
Pesticidas	67 milhões
Torres de comunicação	4,5 milhões
Aviões	25 mil
Aerogeradores	28,5 mil

Fonte: ERICKSON, 2005.

2.4.5 Impacto de Interferência Eletromagnética

Os aerogeradores podem interferir nas transmissões de ondas eletromagnéticas. A sociedade é dependente de equipamentos que utilizam energia eletromagnética, como sinais de rádio, de TV e redes de computadores, e as turbinas eólicas podem causar distúrbios que interferem no modo normal de operação desses sistemas.

As turbinas eólicas podem distorcer consideravelmente sinais eletromagnéticos usados em telecomunicações, navegação e serviços de radares. O grau e natureza da interferência dependerão de (EWEA, 2009):

- a) Localização entre os aerogeradores e sinais de recepção e transmissão;
- b) Características das pás;
- c) Características do receptor de sinal;
- d) Sinal de frequência; e
- e) Propagação da onda de rádio na atmosfera.

A interferência pode ser produzida por três elementos da turbina eólica: a torre, rotação das pás e o gerador. A torre e as pás podem obstruir, refratar ou refletir as ondas eletromagnéticas. Porém, as pás modernas são tipicamente fabricadas com materiais sintéticos que tem um impacto mínimo na transmissão dessas ondas. O sistema elétrico não é comum trazer problemas de telecomunicações, porque a interferência pode ser eliminada com o próprio isolamento da nacelle e uma boa manutenção (EWEA, 2009).

Segundo (EWEA, 2009), a interferência tem sido minimizada com a substituição das pás de metal com materiais sintéticos, porém, quando os aerogeradores são instalados em áreas muito próximas das residências, o impacto da interferência tem se mostrado difícil de eliminar. As técnicas de mitigação de interferência eletromagnética podem ser evitados das seguintes maneiras:

- a) Instalação de antenas de alta qualidade;
- b) Mudar a direção da antena na direção de uma transmissora alternativa;
- c) Instalação de um amplificador;
- d) Realocação da antena;
- e) Construir uma estação repetidora se o sinal da área afetada, caso o sinal tenha sido altamente obstruído.

2.5 LIMITES SUPERIORES – MAIORES AEROGERADORES

O enfoque deste tópico está voltado para as maiores estruturas, apresentando as características que se adequem para a implantação destes aerogeradores.

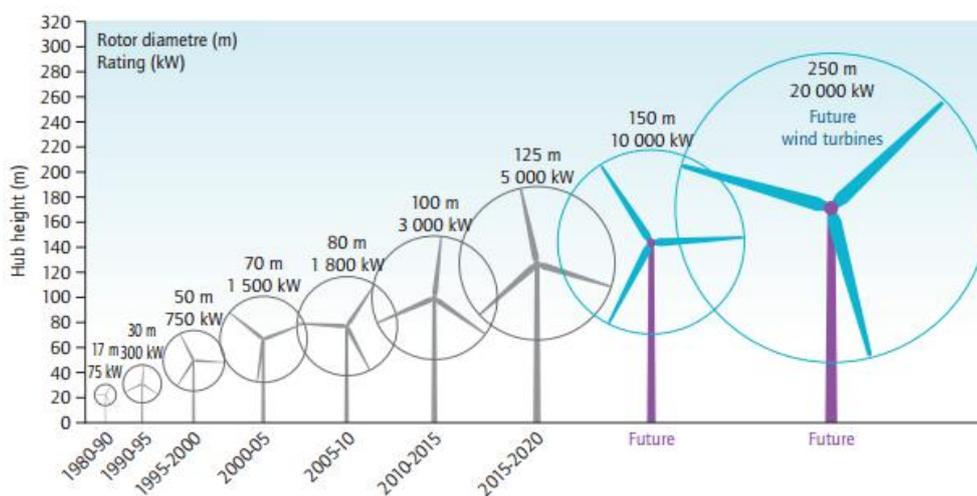
2.5.1 Prospecção tecnológica

O crescente desenvolvimento das tecnologias voltadas para necessidade de construir máquinas competitivas no mercado – em termos de acréscimos e ganhos de eficiência, bem como na melhoria dos resultados econômicos, custo-benefício, em termos de custos índices de geração - resultam na ampliação das estruturas eólicas, tanto em tamanho físico como em potência. A continuidade do crescimento exige alterações, obrigando os engenheiros e gestores a se renovarem constantemente.

O mapeamento tecnológico é o passo inicial, correspondendo à análise voltada para a identificação do comportamento dos avanços na eficiência relacionados aos aspectos dimensionais, por intermédio do qual se pode conhecer as principais direções ou tendências a serem seguidas para a tomada de decisões estratégicas de desenvolvimento e evolução dos modelos de aerogeradores de última geração, superando os empecilhos que dificultam e tornam desafiadora a implantação dos parques eólicos cada vez mais eficientes.

Segundo FALANI, Et Al (2015), que realizaram um estudo sobre a prospecção tecnológica para a geração eólica, constata-se que a tendência geral no desenvolvimento das turbinas eólicas tem sido no aumento do comprimento das pás, altura da torre e a capacidade elétrica de geração. No entanto, o que tem crescido com maior proporção é a altura da torre e o comprimento das pás, comparado com a capacidade elétrica. Na figura 19 verifica-se o crescimento das estruturas, prevendo um aumento no futuro.

Figura 19 – Evolução dos aerogeradores



Fonte: IEA, 2013.

A maior turbina eólica *Onshore* do mundo é a Enercon E-126, seu diâmetro é de 126 metros e a altura do cubo é de 135 metros, podendo gerar até 7,5MW. Mesmo após a tecnologia ter desenvolvido unidades geradoras de alta potência de geração, de acordo com (EPE, 2009), a preferência tem recaído sobre as turbinas de potência unitária entre 1,0 e 3MW, instaladas a cerca de 100 metros de altura, estas em geral são favorecidas pelo custo-benefício.

2.5.2 Estruturação de projetos eólicos

A avaliação dos projetos eólicos não se restringe somente à identificação dos recursos dos ventos, existem critérios importantes que devem ser levados em consideração. As questões ambientais, sociais, técnicas e planejamento trazem grande influência no desenvolvimento dos parques.

Os Atlas Eólicos foram desenvolvidos com o intuito de disponibilizar informações que capacitem o aproveitamento eólico de diversas regiões. A sua metodologia é adaptada para corresponder às condições reais dos projetos, áreas onde os projetos eólicos de grande porte são impossibilitados não são incluídas, como reservas indígenas, áreas sobre rios, lagos e mar, ocupação por estradas, lugares muito próximos às linhas de transmissão (ELETROSUL, 2014).

De acordo com (MONTEZANO, 2012), a identificação de locais promissores que favorecem a implantação dos parques eólicos são:

- a) Ventos notáveis;
- b) Espaço disponível para o projeto;
- c) Rugosidade reduzida;
- d) Transmissão e conexão;
- e) Uso sem interrupção ao longo do funcionamento.
- f) Áreas indicadas pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, em que a velocidade média anual dos ventos seja igual ou superior a 7 m/s;
- g) Baixa rugosidade, com solo plano e leve ondulação;
- h) Ausência de grandes empecilhos para acesso ao local, facilidade para obtenção de licenciamento ambiental;
- i) Em suas proximidades, apresente uma subestação.

Para a implantação dos parques eólicos, inicia-se pela fase de pesquisa em escritório, esta fase tem o intuito de planejar e estudar detalhadamente os locais favorecidos pelos ventos. Segundo a ABBEEólica, para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário uma velocidade mínima dos ventos médios de 7 a 8m/s a 50 metros de altura, esta informação é aplicável para as grandes centrais eólicas.

A segunda fase do trabalho consiste na visita em campo, com base nos dados coletados na pesquisa em escritório, procura-se completar a coleta de informações importantes do local: atividade econômica, acessibilidade, cobertura por sinal telefônico, área disponível para implantação, filmagem e fotografias da região, confirmar as evidências de vento, localizar as subestações e linhas de transmissão, identificar o proprietário do sítio (MONTEZANO, 2012).

Com base nos dados coletados da visita em campo, são identificados os locais estratégicos para alocação dos aerogeradores. Em áreas vizinhas dos locais pesquisados, caso apresente semelhanças no relevo, regime dos ventos e acessibilidade, podem ser levados em consideração para implantação das turbinas eólicas.

2.5.3 Condições restritivas

Desde que se defina o investimento de um parque eólico, o objetivo fundamental é maximizar a produção de energia, reduzindo o custo capital e o custo de operação, com as condições restritivas que o parque impõe. As condições restritivas e os custos estão sujeitos a um nível de incerteza, a otimização dos processos podem minimizar os riscos (EWEA, 2009). De acordo com (EWEA, 2009), as condições que restringem o projeto são:

- a) Máxima capacidade instalada ocorre pela conexão à rede ou contratos de compra de energia;
- b) Distância entre as estradas, locais de habitação, linhas de transmissão, propriedade de terras, etc;
- c) Licenciamento ambiental;
- d) Emissão de ruído às pessoas em residências próximas;
- e) Impacto visual;
- f) Quando os raios solares atingirem as pás, pode projetar sombras nas residências próximas, sendo um critério que deve ser avaliado;
- g) Deve ter um espaçamento mínimo entre os aerogeradores, evitando os efeitos de turbulência em caso de estarem próximos;
- h) Restrições associadas aos sinais de comunicação.

As restrições citadas podem mudar com discussões e negociações entre os agentes envolvidos, isto se torna inevitável com o andamento do projeto.

Após a análise das prováveis restrições, o projeto pode ser inicializado. Isto permite que o tamanho do empreendimento seja definido. Segundo (EWEA, 2009), um guia aproximado para tirar a estimativa da capacidade do vento é da ordem de 12 MW/km². De acordo com (MONTEZANO, 2012), esta é uma estimativa considerando um espaçamento padrão entre os aerogeradores de 4 x 8, na unidade de diâmetro do rotor – sendo o modelo padrão de aerogerador o Enercon E-70. Existem montadoras que fabricam no Brasil - pela empresa Wobben.

Para definir o layout preliminar da usina eólica, é necessário levar em consideração o tamanho das turbinas, devido às diferenças de potência que cada modelo pode gerar, isto pode mudar significativamente as especificações do projeto. A seleção dos modelos específicos dos aerogeradores geralmente são deixados para as fases detalhadas do projeto, quando os dados do fabricante são conhecidos. Enquanto o projeto permanecer nos estágios iniciais, é necessário usar um modelo genérico de aerogerador, definindo a faixa de diâmetro do rotor e altura da torre, ou realizando dois ou três layouts diferentes, baseados em modelos específicos.

O layout preliminar pode ser apresentado para discussão de viabilidade com as autoridades e os agentes envolvidos. Este é um processo de interação entre várias partes envolvidas no projeto, é comum o layout ser alterado nesse estágio.

2.5.4 Otimização da produção de energia

Uma vez definido os contratos do parque eólico, o layout do projeto pode ser otimizado. Este procedimento é chamado de *micro-siting*. Como mencionado, o objetivo é maximizar a produção de energia, reduzindo ao mesmo tempo, os custos operacionais. Na maioria dos projetos eólicos, a viabilidade econômica está mais susceptível às mudanças do que os custos operacionais e de infraestrutura. O mais apropriado é usar a produção de energia como o principal parâmetro para a escolha do layout do projeto.

Para os grandes parques eólicos, é comum encontrar grandes dificuldades para realizar o layout. Os detalhes de projeto podem ser facilitados através de ferramentas computacionais, os softwares fazem várias iterações e podem simular parâmetros como altura da torre, posicionamento e modelo do aerogeradores. Esta ferramenta pode facilitar o ganho da produção de energia (EWEA, 2009).

Os efeitos do impacto visual e ruído foram citados anteriormente.

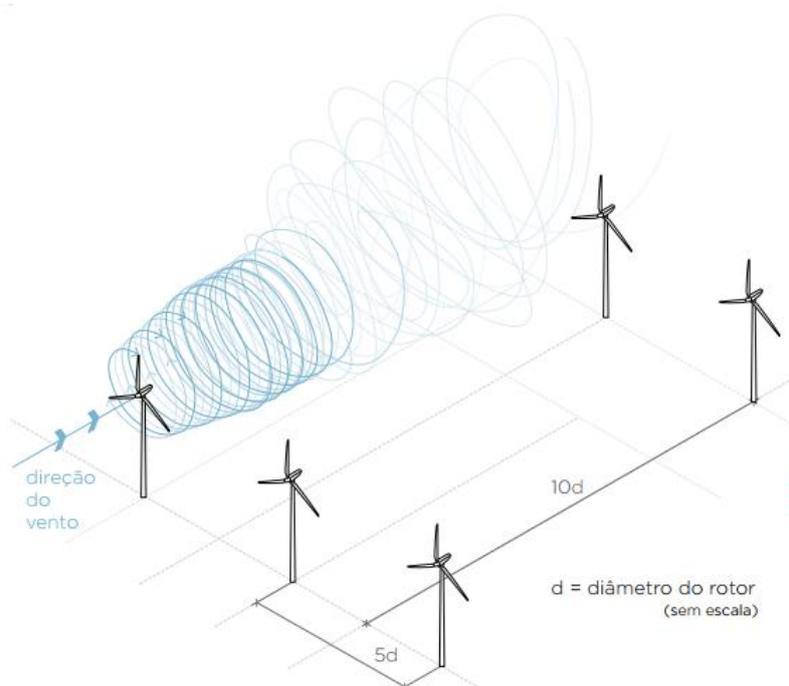
2.5.5 Carregamento do Aerogerador

No projeto dos parques eólicos, deve-se levar em consideração o comportamento dos ventos, as propriedades de fadiga dos materiais e toda a montagem. De acordo com (DWIA, 2003), as turbinas eólicas modernas não são construídas com múltiplas pás, pois elas estariam sujeitas a forças, causando desgastes aerodinâmicos. Os fabricantes das turbinas devem garantir que possam suportar ventos extremos. Para limitar a influência dos ventos extremos, os fabricantes preferem construir turbinas com poucas pás (o modelo mais aceito no mercado é o de três pás), longas e estreitas.

Um fator de grande importância é o espaçamento entre os aerogeradores. O espaço apropriado para as turbinas é muito dependente da natureza do terreno e as rosas dos ventos do sítio. Para espaçamentos menores que 5 diâmetros do rotor (5D) na direção predominante do vento, é provável que ocorram perdas elevadas por efeito esteira (EWEA, 2009).

O efeito esteira ocorre quando, após a passagem do vento pela turbina, a velocidade do vento à jusante do rotor é reduzida (Figura 20).

Figura 20 - Efeito esteira em um parque eólico



Fonte: ELETROSUL, 2014.

Este efeito tem consequências relevantes, como:

- a) A redução da saída de energia das turbinas eólicas subsequentes devido à velocidade de fluxo médio na esteira do rotor;
- b) A turbulência na esteira do rotor, que é inevitavelmente aumentada, também termina aumentando a carga de turbulência nas turbinas afetadas;
- c) Em condições pobres, em que a influência da esteira do rotor pode afetar de modo indesejável o controle do ângulo de passo da pá.

Um parque eólico não produzirá 100% de energia quando comparado à energia produzida de forma isolada. Um parque eólico moderno tem em geral perdas de 10% a 20% devido a sua esteira. No processo de extrair energia cinética, as turbinas eólicas modificam a estrutura do fluxo do vento ao produzir pequenas turbulências e por reduzir significativamente a velocidade do vento.

As perdas num conjunto de turbinas se devem principalmente (PINTO, 2013):

- a) Ao espaçamento entre as turbinas eólicas;
- b) Às características de operação de cada turbina;
- c) Ao número de turbinas e ao tamanho do parque eólico;
- d) À intensidade de turbulência do local;
- e) À distribuição de frequência da direção do vento (rosa dos ventos).

Modelos de esteiras surgiram como ferramentas computacionais que buscam solucionar este problema. As técnicas e os métodos de cálculos são variados, sendo considerada uma tarefa desafiadora simular os efeitos de turbulência da atmosfera juntamente com a modelagem aerodinâmica das pás. De acordo com (PINTO, 2013), a maioria dos modelos de esteira usados pela indústria nos dias de hoje foi desenvolvida nos anos 1980 e início de 1990. Desde então, os diâmetros dos rotores das turbinas eólicas cresceram bruscamente por um fator de 2 a 3 e o comprimento dos parques eólicos aumentou de quatro a seis vezes (não se chegou em um limite definido, a previsão é o crescimento futuro). O efeito desse crescimento é que os modelos (que foram inicialmente projetados e calibrados para pequenas turbinas e

parques eólicos) tenham um desempenho pobre, com limitações. Mesmo apresentando grande quantidade de dados, espera-se que surjam modelos que forneçam informações capazes de melhorar as limitações.

Existem outros fatores que afetam o carregamento do aerogerador do local (EWEA, 2009):

- a) Turbulência natural causada por obstruções, topografia, rugosidade e efeitos térmicos; e
- b) Ventos extremos.

2.5.6 Desafios logísticos

Até o momento não há sinal de que ocorra uma pausa no crescimento das turbinas eólicas, porém existem alguns problemas de logística a serem tratados, como transporte rodoviário de componentes grandes e pesados. Segundo (GAYLORD, 2015), em um estudo sobre os desafios logísticos para o mercado eólico brasileiro, mostra os modelos e os tamanhos utilizados em projetos eólicos em 2009 por fabricante, compara-se com o ano de 2015.

Tabela 4 - Aerogeradores no mercado brasileiro 2009 e 2015

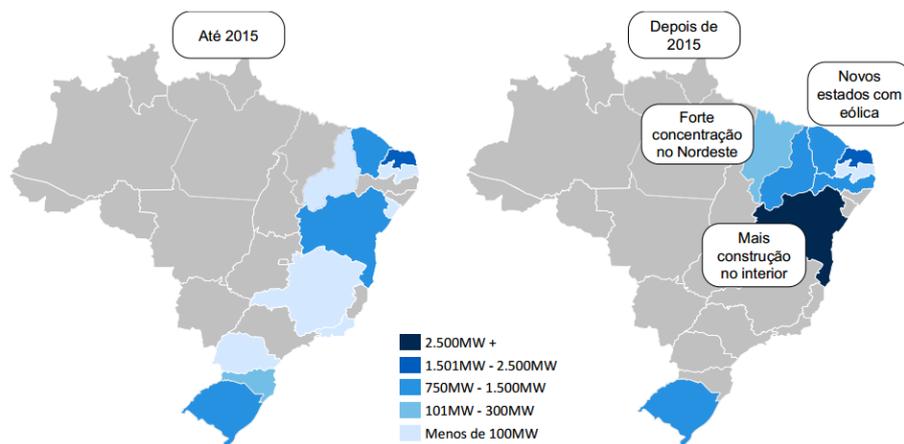
Fabricante	Aerogerador 2009	Pás	Torres	Aerogerador 2015	Pás	Torres
Acciona	n/d	-	-	AW3000 125	61m	120m
Alstom	ECO90	39m	80m	ECO122	60m	89m
Gamesa	G87	43m	78m	G114	55m	93m
GE	1.6 XLE	40m	80m	2.2-107	52m	80m
Vestas	V82	40m	80m	V110	54m	95m
WEG	n/d	-	-	NPS 2.1-110	53m	120m
Wobben	E-82	39m	108m	E-92	44m	108m

Fonte: GAYLORD, 2015.

É evidente que o tamanho das pás cresceu no mercado brasileiro, representando um desafio logístico que podem tornar o seu transporte complicado. Neste estudo, foi citado que os aerogeradores vendidos para projetos futuros apresentam pás com comprimentos de 60 metros, muitos equipamentos são próprios para transportar pás de 40 metros, isto indica que o aumento das estruturas resulta em adequações para que o transporte seja feito de forma segura. Pás maiores implicam em torres mais altas, exigindo guindastes para erguer torres de 100 a 120 metros.

Na região Nordeste do Brasil, futuras usinas eólicas estarão sendo construídas, com a imposição técnica e econômica de serem cada vez mais eficientes, isto indica novos e constantes desafios, em termos de barreiras logísticas de transporte de componentes, por exemplo - tanto para os fabricantes, como para os projetista e instaladores - que precisam serem vencidas. Através da Figura 21 verifica-se a evolução da indústria eólica.

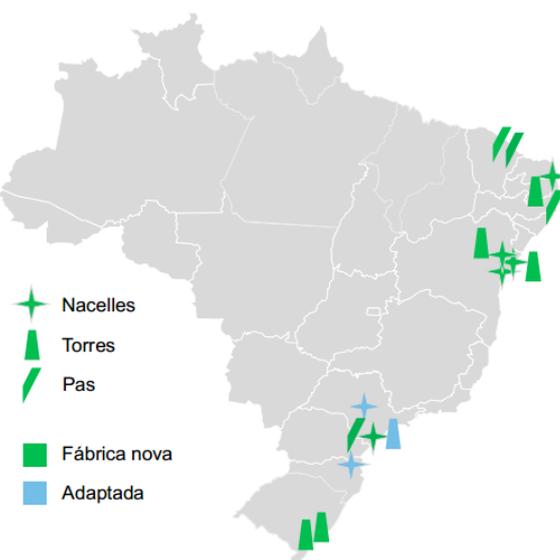
Figura 21 - Localização das usinas eólicas existentes e futuras no Brasil



Fonte: GAYLORD, 2015.

A Figura 22 mostra a localização das fábricas de componentes eólicos no Brasil, grande parte está concentrada no Nordeste, a construção dos componentes próximos às localidades dos parques eólicos pode ajudar na questão da logística, reduzindo custos do transporte.

Figura 22 - Fábricas de componentes eólicos de grande porte no Brasil



Fonte: GAYLORD, 2015.

A cadeia produtiva nacional atinge cerca de 80%, isto significa que cada vez menos se utiliza componentes importados e reduz o transporte nos portos, indicando o uso maior de rodovias.

Além do transporte, investimentos em guindastes criam problemas no cronograma para entrega do projeto. Se trata de guindastes de 600 toneladas para montagem de torres de 120 metros de altura, a disponibilidade destas máquinas não é alta. Os investimentos são custosos e seu uso limita-se exclusivamente para a montagem dos aerogeradores.

Para o transporte das pás, é necessário investir em novos equipamentos, que permitem locomover pás de 50 a 60 metros. Também é necessário de novos investimentos na infraestrutura rodoviária, muitos locais são estreitos para a passagem destes equipamentos e evitar acidentes.

Certamente, a logística pode ser um fator limitante para o crescimento das turbinas, já que existem áreas geográficas não acessíveis para máquinas de grande porte. Sem investimentos, o mercado eólico pode sofrer atrasos para entrega dos projetos.

2.5.7 A importância do Sistema Interligado Nacional (SIN)

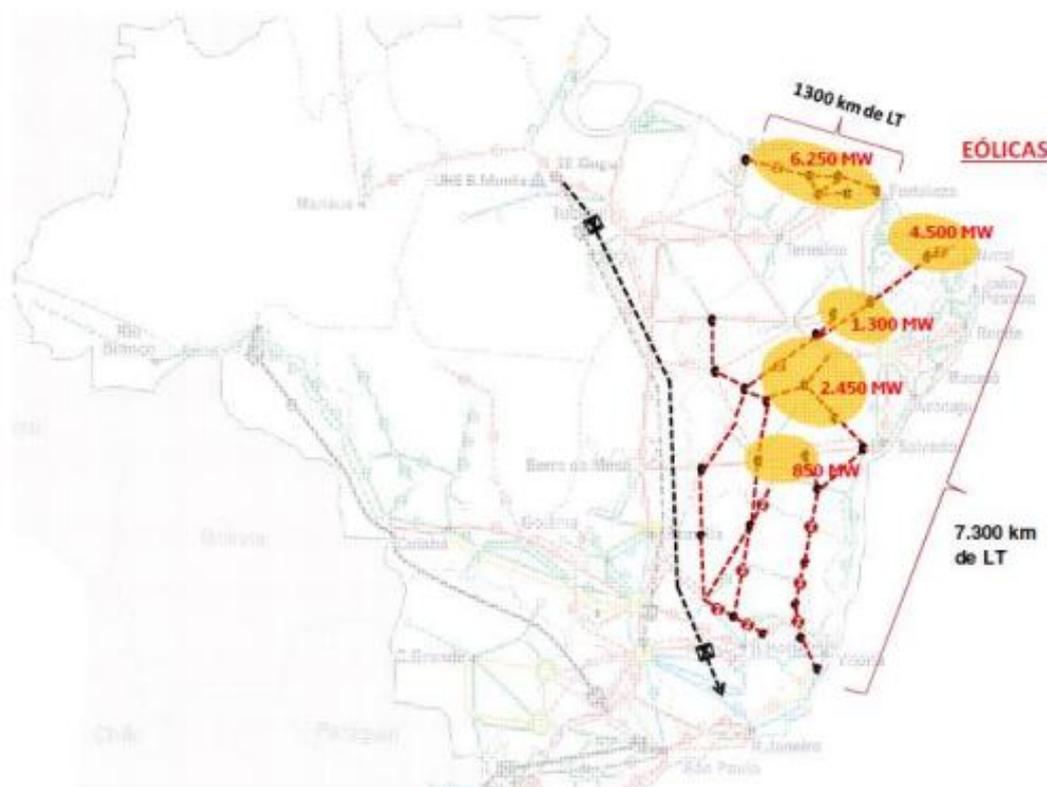
A conexão das unidades geradoras é responsável pelo suprimento de energia aos sistemas interligados. O SIN é predominado pela fonte hídrica, a desvantagem é que as usinas hidrelétricas localizam-se distantes dos grandes centros de consumo. As fontes de geração (térmica, solar, hidrelétrica, eólica, etc) compõem o Sistema Interligado Nacional.

Com o grande crescimento da energia eólica, é exigida a expansão dos sistemas de interligação para garantir a continuidade do atendimento de carga. É necessário operar e controlar para a prevenção de impactos no sistema ao variar a geração das usinas eólicas.

Os principais impactos caracterizam-se por: variações de tensão; distorção harmônica, principalmente causada pelos inversores e retificadores; tensões transitórias causadas pelos distúrbios e faltas do sistema; e Flickers de tensão, este é caracterizado por flutuações de tensão, devido à manobras de carga ou de rede, ocorrem em cargas não lineares. A variação de velocidade da turbina, devido às condições dos ventos, causa pequenas mudanças de tensão e variações de corrente que são o suficientes para serem detectadas em lâmpadas fluorescentes, e conseqüentemente gerar desconforto visual (PINTO, 2013).

Existe previsão de instalação com mais de 15GW até 2019, sendo que 90% deste total vem da região Nordeste, o que necessita de um redimensionamento do sistema interligado dessa região. É necessário dispor de sistemas elétricos de transmissão que garantam folgas para empreendimento futuros, visto que a maior demanda dos consumidores encontram-se nas regiões Sul e Sudeste, e a maior produção de energia eólica localiza-se no Nordeste (EPE, 2016). A Figura 23 representa a expansão efetuada em 2014, dando a possibilidade de acrescentar mais 6.000MW. As regiões circuladas em amarelo representam as instalações efetuadas em 2014 para a integração das usinas eólicas.

Figura 23 - Expansão do SIN para integração da energia eólica nas regiões NE-SE



FONTE: EPE, 2014.

A energia eólica apresenta um grande auxílio quando as usinas hidrelétricas encontram-se em períodos desfavoráveis. Quando ocorre o esvaziamento dos reservatórios de água, as usinas térmicas são acionadas para suprir a demanda. A participação eólica atua como um complemento para a geração hidrelétrica nos períodos de seca.

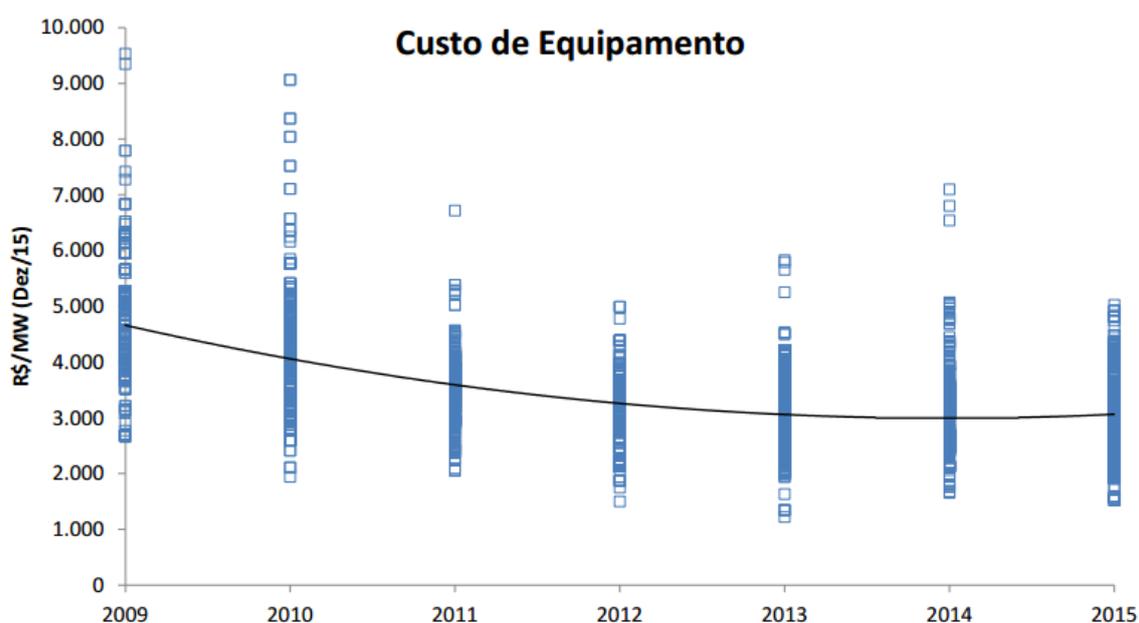
2.5.8 Avaliação econômica no Brasil

A viabilidade econômica está relacionada à produção de energia que o parque eólico pode gerar, influenciada pela velocidade do vento, direção predominante, modelo do aerogerador, quantidade de aerogeradores, espaçamento dos aerogeradores.

A tecnologia de fabricação dos aerogeradores reduziu os custos durante o período de 1980 e 2004, além do aumento da qualidade e tamanho dos aerogeradores. A queda dos custos resulta-se de uma melhoria contínua dos processos de fabricação e métodos de instalação das máquinas.

Porém, o sucesso da energia eólica começou desde o primeiro leilão de energia em 2009. A Figura 24 mostra a evolução dos custos de equipamentos no Brasil. Está incluso o custo da torre e da turbina, houve uma tendência de diminuição dos custos a partir de 2009 e uma estabilização a partir de 2012, ambas alinhadas com as tendências internacionais (EPE, 2016).

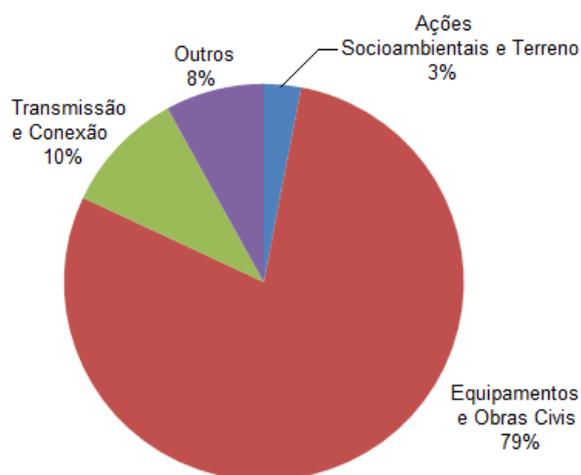
Figura 24 - Custos de equipamentos informados pelos leilões



Fonte: EPE, 2015.

Os empreendimentos de infraestrutura dos projetos eólicos consistem de: ações socioambientais e terreno, equipamentos e obras civis, transmissão e conexão, e outros custos. A Figura 25 mostra a divisão típica dos custos dos projetos eólicos.

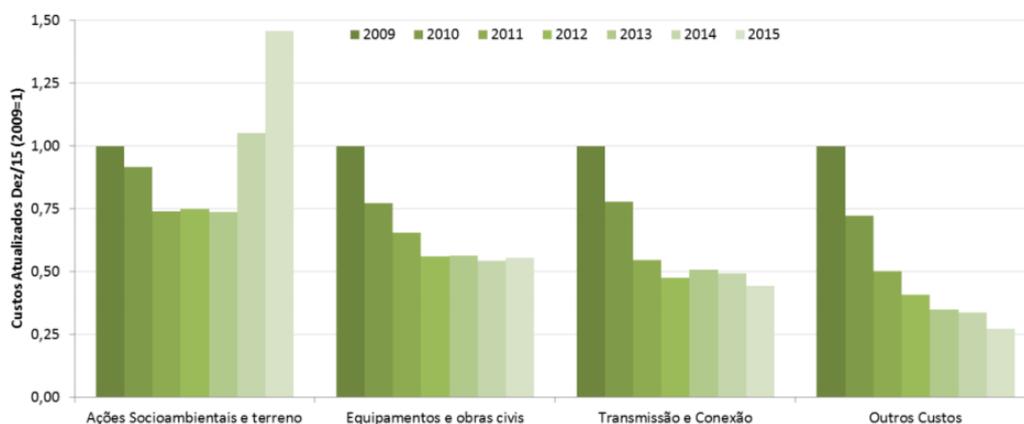
Figura 25 - Repartição dos custos dos empreendimentos eólicos de 2015



Fonte: EPE, 2016.

A infraestrutura de um projeto eólico é feita por dois itens, os Equipamentos e Obras Cívis, e transmissão e conexão. O primeiro se refere à drenagem de estradas, fundações do aerogerador, instalações de torres anemométricas. A transmissão e conexão são as obras elétricas, como transformadores, componentes elétricos de proteção e conexão, cabeamento subterrâneo ou linhas aéreas. Verifica-se que a infraestrutura é a mais relevante, atingindo 79% dos custos. Através da Figura 26 é possível ilustrar a mudança dos custos do ano de 2009 a 2015.

Figura 26 - Evolução dos principais custos dos empreendimentos eólicos



Fonte: EPE, 2016.

Os equipamentos apresentaram grande queda dos custos, assim como a maior parte dos itens dos empreendimentos. Porém, as ações socioambientais aumentaram o valor do investimento, de acordo com (ANEEL, 2016), isto decorre do aumento da complexidade dos estudos e programas socioambientais influenciados pelo processo de licenciamento ambiental.

Segundo (ANEEL, 2016), além dos empreendimentos de infraestrutura, devem ser levados em consideração os custos de operação e manutenção, custos administrativos, os impostos e cargos setoriais. O preço da energia ofertada nos leilões busca estabelecer o equilíbrio da soma de todos os custos dos empreendimentos eólicos.

Verifica-se uma complexidade e amplitude de fatores que envolvem um projeto eólico. Existe um parâmetro de grande importância, que é o fator de capacidade. A competitividade dos leilões gira em torno do potencial energético, este fator é um indicativo da energia gerada por um sistema eólico. O fator de capacidade de um parque eólico é definido como a razão entre a energia gerada e a potência instalada durante o período de um ano.

$$FC = \frac{E_{ano}}{8760 \cdot P_n} \quad (18)$$

Onde:

FC é o Fator de Capacidade (%);

E_{ano} é a Energia produzida pelo aerogerador durante um ano (MWh);

P_n é a Potência nominal do aerogerador (MW);

A Tabela 5 apresenta a média os valores do fator de capacidade de diversos estados, representam os empreendimentos eólicos que venceram os leilões.

Tabela 5 - Valores do fator de capacidade vencedores do leilão

Região	UF	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Nordeste	BA	0,49	0,47	0,55	0,50	0,56	0,56	0,63
	CE	0,45	0,48	0,51		0,57	0,63	0,58
	MA			0,62	0,63			0,64
	PB						0,67	
	PE			0,50		0,57	0,58	
	PI			0,55		0,61	0,61	0,57
	RN	0,50	0,49	0,53		0,57	0,55	0,71
	SE	0,38						
	Total	0,48	0,48	0,53	0,60	0,57	0,58	0,60
Sul	RS	0,42	0,45	0,44	0,42	0,49	0,54	
Total	Total	0,47	0,48	0,51	0,58	0,56	0,58	0,60

Fonte: EPE, 2016.

Os sistemas eólicos na Tabela 4 apresentam o fator de capacidade entre 0,38 e 0,71. A média do fator de capacidade dos leilões chega em torno de 0,43 (EPE, 2016). De acordo com a ABEEólica, esses valores nos demais países giram em torno de 0,30 a 0,35, tornando o Brasil um dos mais produtivos em energia eólica.

A energia eólica é uma fonte competitiva que cresceu de forma exponencial. Esta fonte apresenta um grau de complexidade, por motivos já citados anteriormente, porém a instalação torna-se mais rápidas e menos custosas comparado com outras fontes. O custo médio de instalação da uma usina eólica está próximo de R\$ 4,6 milhões por megawatt (MW). A Tabela 6 mostra os custos da energia no Leilão de 2014.

Tabela 6 - Custos de energia no Leilão em Novembro de 2014

Fonte	Preço da energia (R\$/MWh)
Eólica	136
PCH	162
Carvão Mineral	202
Gás Natural	206
Biomassa	207

Fonte: ABEEólica, 2015.

2.5.9 Aspectos técnicos

O recurso eólico varia de acordo com as condições climatológicas e geográficas, apresentando comportamento variável. Cada região pode apresentar características de ventos muito diferentes, com velocidades de vento muito altas e presença de intensa turbulência. Isto está diretamente relacionado aos esforços que os aerogeradores podem se submeter durante o tempo de vida útil. As turbinas eólicas devem ser projetadas de tal forma que atenda as especificações de cada região. A norma internacional IEC 61400-1 (IEC, 2005b) define quatro classes de projeto, I, II, III e S, estas classes estão associadas à velocidade do vento. As categorias A, B e C, relacionam-se com a intensidade de turbulência de um determinado local (Tabela 7).

Tabela 7 – Parâmetros básicos para classes de turbinas eólicas

Classe	I	II	III	S
V _{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	Definido pelo fabricante
A I _{ref} (-)	0,16			
B I _{ref} (-)	0,14			
C I _{ref} (-)	0,12			

Fonte: IEC, 2005b.

Na Tabela 7, V_{ref} indica a velocidade de referência. O aerogerador deve ser projetado para que resista ventos extremos, medidos a cada 10 minutos em um período de 50 anos, seja menor ou igual à V_{ref} . I_{ref} indica a intensidade da turbulência de referência, calculada através da divisão do desvio padrão da velocidade pela média de velocidade (EPE, 2016).

Através da Tabela 8, observa-se a tendência de uso das classes de aerogeradores no Brasil, apresentando as turbinas dos parques vencedores de leilões de energia. Nota-se que as turbinas mais utilizadas foram das classes II e III, e categoria A (alto grau de turbulência).

Tabela 8 - Classes de turbinas dos parques vencedores dos leilões entre 2010 e 2015

Estado	Classe da Turbina								
	I A	I B	I C	II A	II B	III A	III B	III C	S
Bahia	3%			19%	7%	56%	10%	3%	2%
Ceará				19%	22%	19%	21%		19%
Maranhão							100%		
Paraíba						100%			
Pernambuco		6%		9%	6%	50%			28%
Piauí			2%	8%	2%	75%			13%
Rio Grande do Norte				39%	15%	21%	10%	1%	14%
Rio Grande do Sul	4%			57%	1%	29%	1%		8%
Total	2%	0%	0%	27%	9%	40%	11%	1%	10%

Fonte: EPE, 2016.

Com a Tabela 8, é evidente que a preferência dos projetos eólicos está sobre as regiões Sul e Nordeste. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001), os estados da Região Nordeste, que compreendem o Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte são beneficiados pela combinação dos ventos alísios de leste com as brisas terrestres e marinhas, levando a médias anuais de 6 m/s a 9 m/s. O Litoral que se estende da Paraíba à Bahia apresenta velocidades de 3,5 m/s a 6 m/s nas áreas mais elevadas da Chapada Diamantina.

Na Região Sul, o escoamento dos ventos resulta em velocidades de 5,5 a 6,5 m/s sobre áreas significativamente influenciadas pelas características de relevo e terreno. Os ventos mais intensos ocorrem nas áreas mais elevadas e nos planaltos de baixa rugosidade, alcançando de 7 a 8 m/s.

A Tabela 9 mostra algumas usinas eólicas operando no Brasil, nos primórdios da energia eólica brasileira, predominavam as turbinas de 0,5 MW e 0,6 MW, com diâmetro de 40 metros e altura do cubo variando de 42 a 65 metros. A partir de 2006, a maioria dos parques assumiram turbinas eólicas com potência superior a 1MW, resultado de maiores investimentos e incentivos no setor.

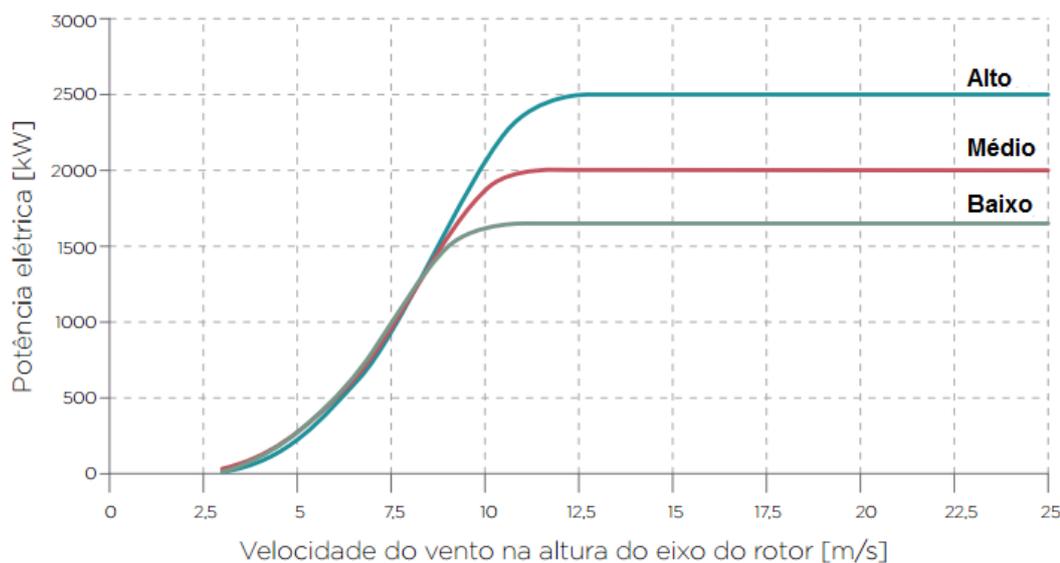
Tabela 9 - Usinas eólicas no Brasil

Usina	Local	Data de operação comercial	Potência nominal (MW)	Gerador
Eólica de Prainha	Aquaraz/CE	2003	10	20 Enercon E-40 de 0,5 MW
Eólica de Taíba	São Gonçalo do Amarante/CE	2003	5	10 Enercon E-40 de 0,5 MW
Parque Eólico do Horizonte	Água Doce/ SC	2003	4,8	8 Enercon E-40 de 0,6 MW
Eólico Água Doce	Água Doce/SC	2006	9	15 Enercon E-40 de 0,6 MW
Parque eólico de Osório	Osório/SC	29/06/2006	50	25 Enercon E-70 de 2 MW
Parque Eólico dos Índios	Osório/SC	13/12/2006	59	25 Enercon E-70 de 2 MW
Parque Eólico de Beberibe	Beberibe/CE	11/09/2008	25,6	32 Enercon E-48 de 0,8 MW
Padra do Sal	Parnaíba/PI	dez/08	18	20 Enercon E-44 de 0,9 MW
Eólicas Praias de Parajuru	Beberibe/CE	ago/09	28,8	19 Impsa IV-77 de 1,5 MW
Canoa Quebrada	Aracati/CE	26/01/2010	57	22 Suzlon de 2,1 MW e 6 de 1,8 MW
Gravatá Fruitrade	Gravatá/PE	abr/10	4,85	3 Vestas V82-165 de 1,65 MW
Alegria I	Guamaré/RN	30/12/2010	51	31 Vestas V82-165 de 1,65 MW
Fazenda Rosário	Palmares do Sul/RS	30/06/2011	8	4 Enercon E-82 de 2 MW
Seabra	Brotas de Macaúbas	06/06/2012	30,6	18 Alstom ECO 86 de 1,67 MW
Novo Horizonte	Brotas de Macaúbas	06/06/2012	30,06	18 Alstom ECO 86 de 1,67 MW

Fonte: PINTO, 2013. Adaptado pelo autor

Os Atlas do Potencial Eólico da Bahia e do Rio Grande do Sul classificaram turbinas que representam as máquinas comercializadas nas regiões. A sua aplicabilidade classifica-se em três faixas de vento: Baixo, Médio e Alto. A Figura 27 apresenta as curvas retiradas do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.

Figura 27 - Curvas de potência representativas das máquinas comercializadas do Rio Grande do Sul



Fonte: ELETROSUL, 2014.

Verificam-se na Figura 25 curvas que relacionam a velocidade do vento pela potência elétrica, nem sempre os aerogeradores estarão operando em plena carga, a potência gerada depende da velocidade do vento, portanto, o fator de capacidade é um parâmetro que indica a eficiência de geração. Vale ressaltar que as turbinas possuem um limite de velocidade, por motivos de segurança, os aerogeradores possuem sistemas de parada para velocidades de vento superiores.

O atlas adaptou os gráficos (Figura 25) para modelos de aerogeradores entre 1,7 a 2,5MW, sempre obedecendo a aplicabilidade e operação das máquinas para as condições locais dos ventos, estes valores estão na faixa da potência citada no item 3.5.1 (1,0 a 3,0MW). As turbinas eólicas seguem um padrão de potência. A medida que o uso de estruturas maiores aumentem, é natural que apareçam novos problemas, como logística e interligação ao SIN.

2.6 LIMITES INFERIORES – MENORES AEROGERADORES

Este tópico tem o objetivo de apresentar questões econômicas técnicas e regulatórias que interferem ou dificultam a implantação dos aerogeradores de pequeno porte.

2.6.1 A geração distribuída

A diversificação juntamente com a ampliação da matriz energética no Brasil encontram diversos benefícios, tanto social como ambiental. Devido a crescente demanda de energia, ainda existem muitas fontes energéticas que emitem gases poluentes derivadas dos combustíveis fósseis, a população não alcançou um modelo sustentável. A micro e a minigeração distribuída é uma solução que complementa o fornecimento de energia elétrica, pois os recursos disponíveis estão cada vez mais distante do consumidor final, muitas vezes, encontram-se problemas e dificuldades para os investimentos nas linhas de transmissão. Os aerogeradores de pequeno porte apresentam um grande potencial energético para esta aplicação, sendo uma alternativa com custos competitivos e de baixo prazo para execução, comparado aos grandes parques eólicos.

A micro ou minigeração distribuída apresenta possíveis soluções para o fornecimento de energia elétrica, podendo gerar energia próximo aos locais de consumo. Além disso, existem áreas em que a energia convencional não pode ser suprida, como ilhas e regiões isoladas das redes elétricas distribuídas no Brasil. Para atender essa pequena parte da população, a micro ou minigeração torna-se mais vantajosa do que realizar a interligação das linhas de transmissão. Gerar energia somente através dos ventos muitas vezes torna-se inviável, por isso com o uso de outras fontes como a fotovoltaica, é possível complementar esta aplicação.

O crescimento neste setor é baixo no Brasil, comparado com os países desenvolvidos. A geração de pequeno porte apresenta uma grande importância, porém, somente será atrativa se houver incentivos e acordos que viabilizam a sua implantação em larga escala. Com a melhoria da viabilidade desta alternativa, é possível tornar a geração de pequeno porte o suficiente para suprir uma grande demanda de consumidores.

2.6.2 Definição de um aerogerador de pequeno porte (APP)

Existem várias definições técnicas de um aerogerador de pequeno porte (APP). A norma internacional IEC 61400-2 define os parâmetros de um APP, a área de varrimento do rotor deve ser inferior a 200m², com potência nominal de até 50kW, gerando uma tensão abaixo de 1000V AC ou 1500V DC. Além desta norma, vários países estabelecem uma definição própria. O limite de capacidade varia na faixa de 15kW a 100kW. O padrão mais adotado para a máxima potência nominal de um APP é de 100kW, esta padronização é adotada devido ao interesse crescente de instalar sistemas de APP conectadas à rede de distribuição, sendo um objetivo muito maior do que a geração de sistemas isolados. Portanto, criar sistemas padronizados traz facilidades, como também é uma forma de levantar o mercado eólico de pequeno porte (WWEA, 2015).

Na prática, a potência nominal máxima de um APP é de 100kW, porém a IEC define um limite equivalente de 50kW. É necessário um acordo unânime para o sistema de classificação.

2.6.3 Tecnologia e aplicações

Os tamanhos mais comuns em projetos de aerogeradores de pequeno porte são entre 1 e 3kW de potência nominal, que correspondem a um diâmetro de aproximadamente 2 a 4m para os de eixo horizontal. Os APP destas dimensões podem empregar uma variedade de mecanismos para controlar a velocidade do rotor (NREL, 2012).

Existem dados de estimativas de velocidade do vento em ambientes rurais, porém em centros urbanos ainda não possui estudos adequados. É necessário prever o comportamento do vento como áreas acima de edifícios. Em áreas rurais predomina praticamente o vento bidimensional, enquanto em centros urbanos é comum a ocorrência de ventos tridimensionais, isto muda os dados estatísticos (Rosa dos ventos, Distribuição de Weibull) e dificulta o projeto.

Figura 28 - Aerogeradores de pequeno porte em centros urbanos



(a) Aerogerador Swift, Michigan

(b) Aerogerador Skystream, California

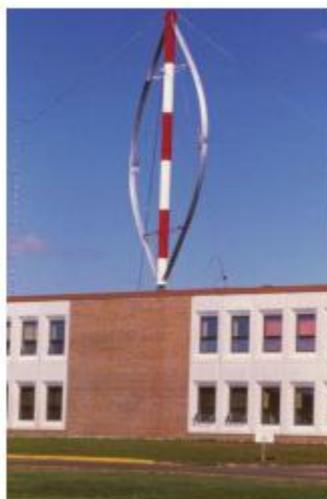
Fonte: NREL, 2012.

A maior aplicação é concebida a ambientes rurais, estas regiões apresentam alta turbulência e variabilidade da direção do vento. Uma das barreiras é a falta de informações sobre o regime do vento, as medições dos ventos devem ser analisadas e disseminadas. Projetos de controle podem auxiliar a tecnologia, como (NREL, 2012):

- Estratégias de controle para reduzir vibração e ruídos;
- Analisar os fatores que afetam o carregamento do aerogerador (fadiga, aerodinâmica, entre outros);
- Um modelo padronizado para projeto e testes dos APP.

Existem vários métodos para a modelagem e previsão dos recursos eólicos de pequeno porte. Os estudos em campo são de extrema importância para estimar o fluxo dos ventos em ambientes urbanos. A Figura 29 apresenta um rotor de Darrieus sobre o telhado de uma escola no Canada.

Figura 29- Turbina de eixo vertical sobre o telhado



Fonte: Ragheb, 2014.

Um APP em cima de um telhado deve ser instalado acima do nível de turbulência. Muito próximos ao telhado, pode causar turbulências na turbina. Para reduzir este efeito, elas devem ser instaladas sobre torres, o lado negativo é o aumento dos custos com torres.

No Brasil, o IDEAL disponibilizou uma cartilha informando um guia prático de procedimentos para microgeração (potência igual ou de até 75 kW) de aerogeradores. Quanto à distância dos obstáculos, é recomendado que o APP seja instalado a uma altura mínima de 10 metros acima do obstáculo mais alto, dentro de uma distância horizontal de raio de 150 metros. Afirma-se que nessas distâncias a turbina sofrerá pouca influencia na geração.

Efeitos de carregamento dos APP devem ser considerados, uma vez que estão sujeitos à ventos turbulentos, a instalação sobre telhados deve garantir uma fixação firme sobre a superfície. A Figura 30 mostra uma torre derrubada por efeitos de turbulências do vento, ocorrido em um colégio no Reino Unido.

Figura 30 - Colapso da turbina de uma torre



Fonte: Ragleb, 2014.

As vibrações e ressonâncias não devem ser subestimadas, os sistemas das turbinas eólicas inerentemente produzem vibrações. Isto acontece quando a frequência de ressonância combinado com a estrutura da torre ou o telhado variam entre 1 a 10 Hz. A instalação sobre telhados pode causar emissão de ruídos, pois a casa ou o edifício pode atuar como uma caixa ressonante. Para prevenir este efeito, a frequência de ressonância deve ser menor que 1 Hz (Ragleb, 2014).

Os testes de ensaios dos APP devem ser feitos em locais abertos livres de pedestres. Devem garantir segurança na fixação, existem inúmeros casos de quedas de pás das turbinas. Segundo Raighleb (2014), ocorreu um caso de uma falha na turbina que foi construída muito próxima a um edifício, a pá acabou atravessando a porta, oferecendo perigo ao proprietário do local.

Não há testes operacionais suficientes e experiências sobre como os APP funcionam sob condições de carregamento ou vento extremamente turbulento. Locomovendo o APP para longe de turbulências causadas por construções e árvores compensa o esforço e o custo extra.

2.6.4 Custos Índices

De acordo com (WWEA, 2015), nos EUA, a estimativa dos custos dos dez melhores modelos de APP em 2011 ficou entre US \$2.300/kW e US \$10.000/kW, a média do custo de instalação total em 2013 foi de \$6.940/kW. Os APP da indústria chinesa, ficaram com os custos significativamente reduzidos, com a média no valor de 12.000 Yuan/kW (1.900 USD – 1.500 EUR) em 2011. No Reino Unido, a média dos custos de instalação em 2013 foi de 3.895 £/kW (5.873 USD/kW).

Um mercado eólico bem sucedido depende de sistemas de incentivos estáveis e adequados. As tarifas de sistemas interligados à rede, acumulação de créditos e subsídios de capital são as principais políticas energéticas orientadas para a geração de pequeno porte. O setor de APP se beneficia mais com o sistema de acumulação de créditos, chamado também de tarifa feed-in (FIT). Infelizmente, nem todos os países implementam este sistema, visto que é a melhor ferramenta de incentivo para a conexão dos APP com a rede elétrica (WWEA, 2015).

No entanto, novas políticas precisam ser criadas e implementadas para sistemas offgrid e minirede (ambos não são conectados à rede elétrica). A Tabela 10 mostra os custos de energia em diversos países para cada limite potência.

Tabela 10 - Tarifas de preços de energia dos APP em diversos países

Country/ Region	Size Limit	EUR/kWh	Country/ Region	Size Limit	EUR/kWh
Canada			Japan	< 20kW	0,418
Nova Scotia	< 50kW	0,350		≥ 20kW	0,167
China (off-grid)	0,2–3kW	0,140	Lithuania	< 10kW	0,081
(on-grid)	5-20kW	0,110		11-350kW	0,075
Chinese Taipei	1-10kW	0,185		> 351kW	0,064
Denmark	< 10kW	0,330	Portugal	< 3,68kW	0,432
	10-25kW	0,200	Slovenia	< 1 MW	0,095
Greece	< 50kW	0,250	Switzerland	< 10MW	0,179
Italy	< 1MW	0,300	UK	< 100kW	0,207
Israel	< 15kW	0,250	USA		
	15-50kW	0,320	Hawaii	< 100kW	0,110
			Vermont	< 15kW	0,200

FONTE: WWEA, 2015.

Para comparação de custos, as figuras a seguir mostram modelos de eixo horizontal e turbinas de eixo vertical em cima de edifícios, todas retiradas da mesma fonte (WINEUR, 2007).

Figura 31 - Fortis Montana



Figura 32 - WES Tulypo



Figura 33 - Turby



Figura 34 - WindSide



Figura 35 - Ropatec



Figura 36 – WindWall



Figura 37 - Energy Ball



Os preços dos APP podem variar dependendo do modelo. A Tabela 11 apresenta os custos de alguns modelos apresentados nas figuras anteriores.

Tabela 11 - Custos de alguns modelos de turbinas

Investment	Fortis Montana	WES Tulipo	Turby	Energy Ball	Ropatec WRE030
	amount (€)				
turbine	7,115	14,950	11,466	2,479	10,750
mast	2,660	included	2,000	840	2,490
inverter	3,850	included	included	450	included
other	375	included	600	71	345
transport	separately charged				
installation, net connection	2,495	2,000	2,700	1,860	2,380
kWh-meter (grid feeding)	separately charged	separately charged	132	separately charged	separately charged
engineering	separately charged	separately charged	240	separately charged	separately charged
lightening safety	none	none	optional	none	optional
grounding	included	included	700	Included	optional
Investment total	16,495	16,950	17,838	5,700	15,965
Operational costs per year					
operational costs	none	none	none	none	none
maintenance	none	175	none	none	none
energy costs	none	none	none	none	none
insurance / year	none	optional	none	none	optional
Replacement costs					
Bearings (per year)	none	none	none	none	none
Inverter (once)	1,300	none	1,300	300	included
Revision after 10 years		1,300			
Warranty	5 years	1 year	2 years	2 years	3 years
Manual	Included	Included	Included	included	included
Remaining value	3,299	3,390	3,568	1,140	5,875
Costs €/kW	4,887	5,424	7,511	9,120	3,363

Fonte: WINEUR, 2007.

2.6.5 Eficiência em centros urbanos

A eficiência das turbinas eólicas está relacionada aos custos, isto é, no custo por kWh da electricidade produzida. A eficiência é medida como um rendimento, sendo (kWh / m² / ano).

Para estimar a eficiência de maneira confiável, só pode ser feita através de comparações entre vários tipos de aerogeradores em centros urbanos. As Tabelas 11 e 12 apresentam comparações de eficiência entre as turbinas apresentadas nas Figuras 32 a 36. Foram consideradas duas velocidades: 12 m/s e 5 m/s.

Tabela 12 - Dados para velocidade do vento de 12 m/s

	<i>v wind ref</i>	<i>v wind nom</i>	<i>P nom</i>	<i>P ref</i>	<i>A</i>	<i>P ref spec</i>
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>kW</i>	<i>kW</i>	<i>m²</i>	<i>kW/m²</i>
Montana	12	10	2,7	4,67	19,60	0,24
WES ⁵ Tulipo	12	9	2,5	5,93	19,60	0,30
Turby	12	12	1,9	1,90	5,30	0,36
Energy Ball	12	15	0,5	0,26	1,00	0,26
Ropatec	12	12	2,5	2,50	7,26	0,34

Fonte: WINEUR, 2007.

Tabela 13 - Dados para velocidade do vento de 5,5 m/s

	<i>v wind ref</i>	<i>v wind nom</i>	<i>P nom</i>	<i>P ref</i>	<i>A</i>	<i>P ref spec</i>
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>kW</i>	<i>kW</i>	<i>m²</i>	<i>kW/m²</i>
Montana	5,5	10	2,7	0,45	19,60	0,02
WES ⁵ Tulipo	5,5	9	2,5	0,57	19,60	0,03
Turby	5,5	12	1,9	0,18	5,30	0,03
Energy Ball	5,5	15	0,5	0,02	1,00	0,02
Ropatec	5,5	12	2,5	0,24	7,26	0,03

Fonte: WINEUR, 2007.

2.6.6 Avaliação Regulatória Brasileira

A legislação é um fator importante para a implantação destes energéticos. Através dela pode-se avaliar os requisitos para a instalação, como questões ambientais, normas específicas do município ou de segurança. A Geração Distribuída possui leis que a inserem no Setor Elétrico Brasileiro, e também apresenta a inclusão de várias fontes energéticas renováveis.

A Resolução Normativa nº482 de 17 de Abril de 2012, estabelece critérios para a Microgeração e a Minigeração, contemplando as fontes solares, hídricas, biomassa, eólicas, cogeração e cogeração qualificada. Também contempla a compensação de energia, através do acúmulo de créditos.

Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2016).

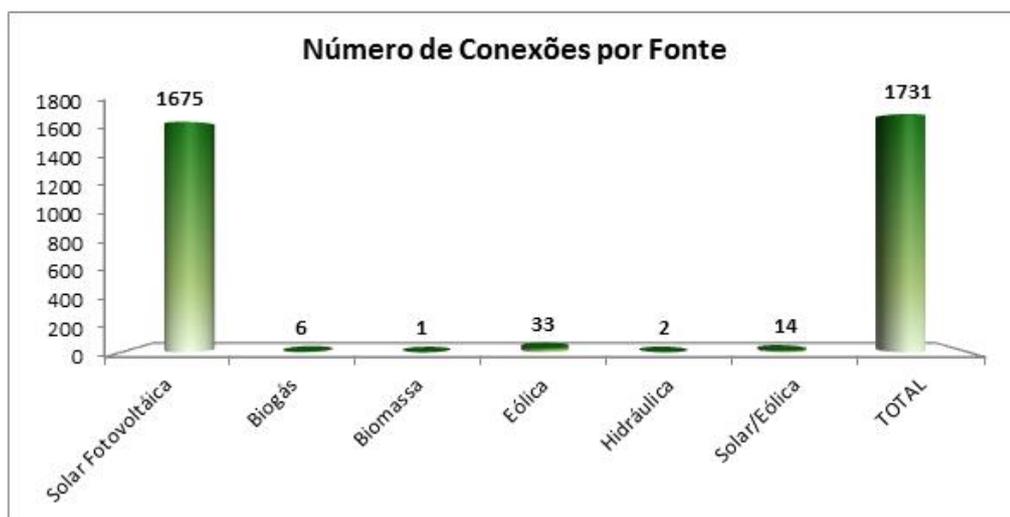
2.6.7 O mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil

Nota-se um grande desbalanceamento de projetos na geração distribuída, a solar fotovoltaica tem levado vantagem em potência instalada comparado com os pequenos aerogeradores, ao mesmo tempo que o mercado de energia eólica de pequeno porte é muito incipiente. O Brasil possui várias empresas voltadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração, contando com maiores programas de incentivos que viabilizam a sua implantação.

A resolução normativa nº481/12 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012e), estabeleceu desconto de 50% a 80% nas tarifas para o uso de sistemas fotovoltaicos de distribuição e transmissão com potência inferior a 30 MW, desde que o projeto entre em operação até 31 de dezembro de 2017. Este desconto é aplicável nos 10 primeiros anos, após este prazo o terá redução de 50%.

No fim de 2015, a geração distribuída fotovoltaica alcançou 1675 adesões e 13,3MW de potência instalada, enquanto a eólica 33 instalações e 121 kW (ANEEL, 2016). A Figura 38 mostra o número de adesões no ano de 2015.

Figura 38 - Número de conexões por fonte



Fonte: ANEEL, 2016

O segmento eólico de pequeno porte no país ainda está em estado embrionário, enquanto a geração dos grandes parques eólicos tem um crescimento contínuo devido ações governamentais que proporcionam condições que consolidam sua segmentação. Diversas considerações foram feitas para determinar o potencial eólico de grande porte, através de atlas publicados, nas quais não se aplicam para a tecnologia de pequeno porte, dessa forma, torna-se necessária a análise cuidadosa e criteriosa afim de um garantir método mais preciso para os aerogeradores de pequeno porte.

As empresas brasileiras possuem poucos modelos disponíveis e baixa escala de produção, devido ao mercado incipiente. De acordo com (GIANNINI, DUTRA e MONTEZANO, 2015), o CEPEL iniciou um estudo sobre a percepção dos produtores dos aerogeradores de pequeno porte. Destaca-se que os fabricantes e revendedores desse segmento tem pouco tempo de atuação no mercado. Os modelos predominantes no Brasil são de eixo horizontal, das cinco empresas que participaram da entrevista, obteve-se informação de somente um modelo de aerogerador de eixo vertical (modelo de 1,5kW). Os aerogeradores de pequeno porte de eixo vertical tem sua devida importância, pois são apropriados para centros urbanos, em que o grau de turbulência dos ventos é alto e por minimizar o nível de ruído. Os principais compradores são consumidores residenciais, fazendas, empresas/fábricas/comércio e universidades, eles foram unânimes em indicar a tecnologia fotovoltaica como principal concorrente. A partir das informações apresentadas por alguns fabricantes, o custo médio da instalação está na faixa de R\$12,00 a R\$15,00/W. Comparando com a faixa de valores dos produtos fotovoltaicos no Brasil, verificou-se que os equipamentos eólicos de pequeno porte têm valores semelhantes aos fotovoltaicos. As fontes de financiamento no setor produtivo são incipientes, no entanto, as empresas participantes da pesquisa apresentaram uma visão otimista para o futuro, com perspectivas positivas para ampliação e diversificação na produção, apesar deste otimismo, não é uma percepção conclusiva.

Com base nesta pesquisa, a resolução Aneel nº 482/2012 não é suficiente para garantir a expansão destes tipos de aerogeradores no Brasil, existe uma necessidade de financiamento público para o consumidor, além da possibilidade da venda de eletricidade através do acúmulo de créditos. Para a consolidação destes potenciais, necessita-se de recomendações estratégicas, trazendo crescimento e desenvolvimento para este setor, podendo ser elas:

- Desenvolver fóruns de discussão entre agentes de mercado, disseminando o conhecimento e as tecnologias para facilitar a segmentação e redução da assimetria de informações;
- Desenvolvimento ou aprimoramento de banco de dados de instalações de sistemas eólicos de pequeno e médio porte;

- Desenvolver certificadores e capacitadores para aumentar a credibilidade e informações técnicas do setor;
- Desenvolvimento do Atlas de Energia Eólica para geração de pequeno porte (entre 10m e 40m de altura), trazendo informações mais confiáveis neste setor;
- Criação de novos modelos de negócios para a comercialização para os excedentes de energia gerada, trazendo novas formas de incentivos para a geração distribuída;

Estas bases de informações podem contribuir para o crescimento e desenvolvimento para a micro e minigeração distribuída no Brasil, podendo ser aplicada além dos pequenos aerogeradores, como em outras fontes de geração.

2.6.8 O mercado de energia eólica de pequeno porte nos EUA

Avaliar a presente situação do mercado de energia eólica de pequeno porte dos EUA é de grande importância. Pois, através da identificação das principais características do setor, assim como seus desafios e oportunidades, é possível obter um potencial aprendizado para o mercado brasileiro.

Segundo (GIANNINI, DUTRA e GUEDES, 2013), existem, de forma geral, poucas empresas no Brasil atuando no ramo das turbinas eólicas e equipamentos voltados para a geração de sistemas de pequeno porte - diferentemente da China e dos EUA, onde já se possui unidades instaladas de 450.000 e 144.000, respectivamente. O total da capacidade instalada de pequeno porte no mundo é de 443MW (2010), sendo 40% concentrando-se nos EUA e 37% na China. A taxa média de crescimento mundial é de 35% ao ano, os principais fabricantes são: Estados Unidos, China, Canadá, Reino Unido e Alemanha.

Esta tecnologia possui alto potencial de crescimento no mercado americano, considerando a perspectiva de geração distribuída e de tecnologias de baixo custo. Os APP podem contribuir para a redução da dependência do fornecimento externo de energia, enquanto promove diversos benefícios para a economia doméstica, como por exemplo a ampliação dos postos de trabalho (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

Uma estimativa de (AWEA, 2002) indica que em 2020 o mercado de APP poderia contribuir com até 8% da demanda de energia elétrica nos EUA. Tais estimativas indicam que o mercado dos EUA pode atingir US\$ 1 bilhão por ano, empregando 10.000 pessoas na fabricação, vendas, instalação e suporte.

O potencial de mercado para aplicações em residências e pequeno comércio é considerável, no entanto ainda existem diversos desafios a serem enfrentados, associados ao mercado, as políticas de incentivo e ao desenvolvimento tecnológico. Cabe observar a existência de outros mercados, e quando combinados podem oferecer significativas oportunidades de expansão para a geração de energia elétrica descentralizada. É possível exemplificar a existência de 2 milhões de prédios comerciais de médio porte onde se pode dispor de turbinas de 10 a 100kW. Adicionalmente, é possível incluir escolas e prédios públicos nos quais são naturais candidatos para o aproveitamento do recurso eólico de pequeno porte nos EUA (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

Serão explicados dois itens sobre o mercado americano de APP: Barreiras e Estratégias de Ação; e Sistemas de incentivo.

a) Barreiras e Estratégias de Ação

O mercado americano apresenta algumas barreiras, a Tabela 14 apresenta as principais delas.

Tabela 14 - Principais barreiras encontradas no mercado americano

Segurança	O efeito fadiga do equipamento em ambientes urbanos ou periurbanos é pouco conhecida.
Recurso Eólico	O recurso eólico em áreas urbanas e periurbanas é pouco conhecido, especialmente os seguintes aspectos: estratégias de controle para reduzir vibração e ruído; perfil da velocidade do vento tridimensional; inexistência do mapa do recurso eólico para ambientes construídos;
Tecnologia do Aerogerador	Pouco conhecimento sobre a tecnologia do aerogerador em ambiente construído, particularmente nas questões associadas a estratégias de controle de ruído e vibração. Padrões de design e de testes em ambientes construídos são inexistentes.
Ambiente Construído	Frequência de ressonância é pouco conhecida. Integração elétrica e mecânica não são triviais e ainda possuem um custo alto. O código de obras não contempla a questão do aerogerador, trazendo incertezas para o construtor/investidor.
Obstáculos não-técnicos	Previsão do retorno do investimento ainda não é claro. Divulgação e treinamento são requisitos necessários para reduzir a assimetria de informação. Existe perigo na instalação e manutenção dos aerogeradores em ambientes construídos.

FONTE: NREL, 2012.

Segurança é um fator crítico. Os APP podem ser instalados próximas às construções residenciais e comerciais nos centros urbanos, entre outras propriedades, neste sentido caso ocorra falha, a mesma poderia ter um efeito negativo tanto na danificação da propriedade quanto na possibilidade de ferir alguma pessoa, além da imagem comprometida da tecnologia (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

Avaliação do recurso é outra questão extremamente relevante, considerando que pode-se verificar significativa diferença do potencial de recurso eólico entre diversos sites. Informação e entendimento do recurso eólico disponível é crítico para o desenvolvimento do projeto, assim como na estimativa da produção de energia elétrica. Por outro lado, o ambiente construído ainda é pouco entendido sobre seu impacto na geração de energia, considerando que ainda existe pouco conhecimento que possa ser aplicado sobre seu impacto na avaliação de recursos eólicos em ambientes construídos. Entre a falta de informação e de entendimento cabe destacar as seguintes áreas: Turbulência e variabilidade direcional no ambiente construído; Vórtices e zona de separação & Distribuição e perfil da velocidade do vento em 3D (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

A interação com o ambiente construído é de grande importância. A preocupação não se limita a montagem da turbina na construção, mas, também, a ressonância de frequência, conformidade com o código de obras e a integração mecânica e elétrica. A proximidade das turbinas às pessoas podem criar áreas de zoneamento adicionais, além de outras questões de licenciamento associado ao código de obras local. Se estas questões forem bem elaboradas pelo poder público, tais poderão reduzir os riscos de instalação e manutenção das turbinas, particularmente nas áreas urbanas (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

Outras barreiras não técnicas são também observadas especialmente voltadas para os perigos associados à instalação e manutenção das turbinas, divulgação da tecnologia e aspectos econômicos e depolíticas públicas. Considerando as barreiras observadas é possível apontar estratégias de ação vislumbrando o horizonte de curto prazo. Quanto aos aspectos não técnicos associados ao baixo grau de informação pelo consumidor é possível direcionar a elaboração de um guia para o consumidor. Quando considerada a questão da pouca informação associadas aos instaladores e planejadores é desejável desenvolver no curto prazo um guia baseado em fatos e os riscos relacionados ao processo. Ainda considerando as barreiras não técnicas, em relação a incertezas econômicas associadas ao projeto, sugere-se a realização de pesquisa de campo e análise dos dados disponíveis (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

b) Sistemas de incentivo

A ampliação do setor aos moldes da energia eólica de grande porte ainda é um grande desafio, mesmo para os países desenvolvidos como os EUA ou Reino Unido. No entanto, é fundamental entender as forças motoras que estão por traz desta tecnologia e que cada dia vem ganhando mais espaço no mercado mundial.

O sistema de incentivo americano não se restringe somente a tarifa feed-in (FIT). Existe um conjunto de sistemas que promovem o incentivo ao mercado de pequeno porte americano, criando um ambiente favorável de negócios à tecnologia, como exemplo: créditos em impostos, subsídios de capital, entre

outros. De acordo com (DOE, 2015b), os APP podem ter 30% dos custos de investimento de projeto reembolsado em crédito, com limite de potência em até 100kW, considerando os pequenos aerogeradores certificados pelas normas da IEC e outros padrões de segurança. Segundo (USDA, 2015), através do Rural Energy for America Program Renewable Energy Systems & Energy Efficiency Improvement Loans & Grants (REAP) do Departamento de Agricultura e de desenvolvimento Rural (USDA), é possível obter concessão para até 75% do custo do projeto ou, no máximo de US\$ 25 milhões para projetos de energia renovável. Subsídios são cobertos para até 25% do custo do projeto ou máximo de US\$ 500.000 para projetos de energia renovável. O REAP traz assistência financeira aos produtores para o setor agrícolas e pequenas empresas rurais para comprar, instalar e construir sistemas de energia renovável, utilização das energias renováveis que melhorem a eficiência energética (GIANNINI, SILVA e FREITAS, 2016).

O que em destaque neste tópico é que a rapidez da transição para o uso de energias renováveis, em especial os APP, dependem de políticas públicas e de incentivos financeiros específicos. Os mecanismos de incentivo vão além do FIT, e buscar a promoção do setor de energia eólica de pequeno porte no Brasil ainda é um grande desafio, mas lições podem ser aprendidas com a experiência americana:

- Aproximação entre os centros de pesquisas/ Universidades e os desenvolvedores, criando não apenas um ambiente de diálogo, mas também a constante interação entre a ciência e a indústria;
- Créditos em imposto no âmbito federal (Ex abatimento do imposto de renda em até 30% para instalações residenciais, por tempo determinado);
- Financiamento público da tecnologia para reduzir o custo do investimento inicial; e
- Grande preocupação com a questão da certificação, assim como na busca do desenvolvimento de padrões e testes para turbinas orientadas para as áreas urbanas.

3. DISCUSSÃO

O aproveitamento da energia eólica cresceu expressivamente nos últimos anos, sendo uma fonte competitiva. Também é resultado de uma tendência de mitigar os impactos do efeito estufa, mesmo a energia eólica sendo considerada uma fonte limpa, ela não está livre de impactos negativos. Dependendo do local e do porte do projeto eólico, podem ocorrer processos rigorosos de licenciamento ambiental.

Porém, vale considerar, a geração eólica é uma fonte que traz benefícios socioambientais, mesmo com os desafios encontrados, apresenta diversos aspectos positivos como exemplo: a redução de gases poluente, não impossibilita o uso de terras para agricultura, minimizando a interferência nas atividades típicas do local. Além disso, o investimento neste setor traz fomento à economia local.

Comparados às instalações das fontes de energia hidrelétrica ou térmica, a instalação dos projetos eólicos são feitos em um tempo muito menor, além disso, as fontes tradicionais trazem impactos a fauna e a flora maiores.

Outro aspecto positivo é o desenvolvimento da indústria nacional de aerogeradores, melhora o reconhecimento internacional e gera empregos no país.

Tratando-se de aspectos técnicos, a otimização de informações e estudos para consolidar o mapeamento eólico é de grande importância. Existe um desafio para os empreendimentos eólicos em áreas urbanas, a indústria de APP consiste basicamente em aerogeradores de eixo horizontal, a emissão de ruído é um problema que deve ser minimizado. Com investimentos em aerogeradores de eixo vertical, os problemas de ruído a turbulência podem ser reduzidos.

A disseminação de informações e troca de experiências com o meio internacional podem trazer resultados positivos para o desenvolvimento sustentável e eficiente. Por fim, é evidente que a cooperação mútua entre os agentes envolvidos (empreendedores, consumidores, poder público) podem sistematizar as informações e trazer avanços neste setor.

4. CONCLUSÃO

De uma forma geral, com este trabalho permitiu-se identificar alguns dos fatores dimensionais que limitam o tamanho dos aerogeradores, tanto no que diz respeito às plantas que empregam desde pequenos às que empregam grandes aerogeradores. Por mais que a tecnologia tenha evoluído e esteja em constante desenvolvimento, foi possível observar que nem sempre é trivial dispor totalmente dela – como foi possível constatar através da prospecção e a análise técnica conduzida por este trabalho. Aspectos relacionados ao planejamento energético e às políticas econômicas também interferem tanto no desenvolvimento, quanto na disponibilidade e mesmo o acesso às tecnologias, tal como o que ocorre com os aerogeradores.

Como proposto na hipótese, foi possível definir os critérios básicos de dimensionamento dos aerogeradores. Deve-se enfatizar que não é tarefa simples definir um modelo exato para uma dada região, pois, existem fatores que dificultam estimar o potencial com precisão, como por exemplo, o regime dos ventos e a rugosidade do terreno – visto que cada região tem as suas características próprias, sendo aquelas que se relacionam ao desempenho dos pequenos aerogeradores, particularmente críticas. As informações das potências típicas dos aerogeradores apresentadas neste trabalho foram baseadas em dados técnicos – com o que foi possível constatar que, para turbinas de grande porte definiu-se padrões de potência nominal comercialmente definidos, seguindo indicadores de compatibilidade em conformidade com as características climáticas dos sítios regionais que dispõem de potencialidades já pré-inventariadas.

A localização dos parques eólicos também é considerada um desafio, pois, envolve diversas variáveis que estão ligadas às restrições, tanto ambientais como técnicas. Para este problema ser resolvido, os projetos devem conciliar estas restrições. Os atlas disponíveis são ferramentas úteis para determinar o potencial eólico de uma região estudada. Porém, considerando a complexidade do projeto, apenas o uso dos atlas não é

suficiente para representação do modelo de dados do vento, sendo tomado apenas um indicativo de que a área estudada é promissora.

Houve um crescimento significativo do tamanho dos aerogeradores e das suas respectivas estruturas, nestas duas últimas décadas, o que representa um desafio para o transporte dos aerogeradores. Exigindo equipamentos novos para transportar as pás, e guindastes para erguer torres maiores. A construção dos componentes eólicos próximos às usinas mostrou-se eficiente para auxiliar o transporte. Portanto, sem o investimento eficiente da logística, o mercado eólico pode atrasar a entrega dos projetos aos clientes.

A evolução dos investimentos no setor eólico teve início pelo programa PROINFA, e garantiu grandes resultados em termos de potência instalada. O verdadeiro crescimento desta fonte no Brasil se iniciou a partir do primeiro leilão de energia em 2009, trazendo aumento da competitividade, dos aerogeradores e da capacidade de geração. O crescimento da participação da energia eólica contribui para o surgimento de problemas, como a falta da estabilidade de abastecimento. Por isso, o fator de capacidade é um parâmetro importante para a competitividade deste energético. O Brasil tem o fator de capacidade médio da ordem de 0,45, enquanto os demais países atingem o número em torno de 0,30 a 0,35. O potencial de geração eólico brasileiro é considerado um dos mais favoráveis.

Os locais mais promissores para a geração eólica no Brasil estão localizados nas regiões Sul e Nordeste, com maior expressividade no Nordeste. O Sistema Interligado Nacional deve expandir, pois tem um papel fundamental para garantir o funcionamento de energia, segundo a (EPE, 2016), a energia eólica tem proporcionado um acréscimo na segurança de operação do SIN, pois permite um menor esvaziamento dos reservatórios e diminui o uso da energia térmica em períodos hídricos desfavoráveis.

A potência instalada cresceu a medida que os investimentos e incentivos aumentaram, com a expansão do setor eólico, é trivial que ocorram o aumento das estruturas e surjam novos impasses. Deve haver um planejamento eficiente para integrar a energia eólica no SIN.

A geração eólica de pequeno porte é de importância fundamental para reduzir fontes energéticas emissoras de gases poluentes, além disso, apresenta vantagens para o fornecimento de energia elétrica, como a geração próxima ao consumidor, diminuindo os custos em linhas de transmissão. A falta de incentivos neste setor faz com que não seja atrativa para o consumidor.

Esta área não tem acompanhado o crescimento da geração de grande porte. É essencial abrir espaço para que o consumidor possa gerar sua própria energia através de investimentos e programas de incentivo. A Resolução Normativa 482 regulamenta o sistema de compensação energética, onde o consumidor final pode gerar sua própria energia e acumular créditos, estes créditos têm validade em até 36 meses. Esta resolução aparenta ser um grande benefício e incentivo para o consumidor, mas na prática mostra-se que não é o suficiente. O retorno para o investimento leva 7 anos, mesmo assim, não possibilita zerar a conta de energia elétrica, por causa de impostos e disponibilidade da fonte eólica. Na maioria dos estados, o excedente de energia é taxado, dificultando o consumidor final receber um adicional.

É necessário acelerar o processo de incentivo ao consumidor, na geração de pequeno porte, no que diz respeito à energia fotovoltaica, segue em uma posição disparada em comparação com as demais fontes, onde se verifica um número significativamente alto em conexões à rede elétrica de sistemas fotovoltaicos. Este fato deve-se aos incentivos e investimentos propostos ao consumidor.

Atingir o objetivo de expandir a geração de pequeno porte não é simples, como visto na geração eólica de pequeno porte nos EUA, os países desenvolvidos também encontram barreiras. Diagnosticar os desafios e oportunidades do setor é a questão central para a melhor compreensão das decisões estratégicas. Os sistemas de incentivo nos EUA não se restringem somente ao acúmulo de excedente de energia, várias outras medidas são utilizadas para incentivar o consumidor final.

Os aerogeradores de pequeno porte no Brasil se encontram em estado embrionário. O apoio financeiro e os sistemas de incentivo estão em falta, existe uma insegurança quanto a produção de energia, pois necessita de um

investimento inicial que não é baixo. O Brasil tem um grande potencial a ser explorado, tendo um interesse da sociedade que aumenta constantemente em utilizá-la.

Em face deste desafio, cabe observar as lições que podem ser aprendidas com a experiência dos EUA – ressaltando-se, por exemplo: métodos alternativos de compensação de energia, maior cobertura financeira para o investimento eólico de pequeno porte. Constatase, pois ser indispensável a continuidade e a interação entre agentes setoriais envolvidos, que podem identificar as grandes necessidades que afetam a expansão do mercado da geração eólica distribuída brasileira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA, **Boletim de dados**. São Paulo-SP, 2016.

ANEEL, **Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016

AGDI/ ELETROSUL, **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**. 2014.

AWEA. **Roadmap: a 20-year industry plan for small wind turbine technology**. American Wind Energy Association AWEA, USA, 2002.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: CEPEL, 2001.

CRUZ, D. T. **Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: Propostas para desenvolvimento do Setor**. Dissertação de mestrado em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

DOE, 2015(b). **Business Energy Investment Credit (ITC)**. U.S. Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy. Disponível em: <<http://energy.gov/savings/business-energy-investment-taxcredit-itc>>

DUARTE P. A. S. C. **Interface de uma Gerador Eólico de Pequena Potência com a Rede Elétrica**. Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2010.

DUTRA R. M. **Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA**. Tese de doutorado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

DUTRA, GIANNINI e MONTEZANO. **Aerogeradores de Pequeno Porte: Percepção dos Produtores**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2015.

DWIA, **Guided Tour on Wind Energy**: Danish Wind Industry Association. Disponível em: <<http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/>>

ESPALANGA O. A. S. **Viabilidade técnica de projeto eólico na região de Urubici**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

EWEA, 2009, **Wind Energy - The Facts**. [S.l.]: European Wind Energy Association. Disponível em: <<http://www.wind-energy-the-facts.org/>>.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia eólica**. 1. Ed. Barueri, SP: Manole, 2011.

FALANI, GONZÁLEZ, CARDONE, JUSTINO e VASCONCELOS. **Prospecção Tecnológica para a Geração Eólica**. Brazil Windpower Conference and Exhibition, 2015.

GAYLORD. **Desafios Logísticos para o Mercado Eólico Brasileiro**. Brazil Windpower Conference and Exhibition, 2015.

GIANNINI, DUTRA e GUEDES. **Estudo prospectivo do mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2013.

GIANNINI, SILVA e FREITAS. **Mercado de energia eólica de pequeno porte nos EUA: Elementos para o debate**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016.

GWEC. **Global Wind Report: Annual Market Update 2015**. Bruxelas, Bélgica: GWEC, 2016.

MONTEZANO B. E. M. **Estratégias para identificação de sítios eólicos promissores usando sistema de informação geográfica e algoritmos evolutivos**. Dissertação de mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

NREL, 2012. **Built-Environment Wind Turbine Roadmap**. National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5000-50499, Colorado, USA, November 2012.

OECD/ IEA, **Technology Roadmap, Wind Energy**. 2013.

PINTO, M. O. **Fundamentos de energia eólica**. 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013.

R. R. PARIZOTTO, C. E. C. NOGUEIRA, J. A. C. SIQUEIRA, E. PETRÓ, **Análise e viabilidade técnica de implantação de aerogeradores eólicos de pequeno porte em residências.** Universidade Federal do Oeste do Paraná, 2012.

EPE. **Expansão das Interligações N–SE e NE–SE para Atender a Cenários Extremos de Exportação das Regiões N e NE – Concepção Inicial de Alternativas: Estudos para a Expansão da Transmissão.** Rio de Janeiro: EPE, outubro 2014.

— **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar e Oceânica.** Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, 2016.

USDA. Rural Energy for America Program Renewable Energy Systems & Energy Efficiency Improvement Loans & Grants – REAP. Departamento de Agricultura e de Desenvolvimento Rural (USDA), 2015. Disponível em: <<http://www.rd.usda.gov/programs-services/rural-energy-america-program-renewable-energy-systemsenergy-efficiency>>

WWEA. **Small Wind World Report Summary.** Bonn, Germany, 2015.

Martins, Guarnieri e Pereira, **Revista Brasileira de Ensino de Física** **30**, 1304 (2008)

IDEAL. **Como faço para ter energia eólica em minha casa?** Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América latina, 2014. Disponível em: < <http://institutoideal.org/guiaeolica/>>

WINEUR. **Urban Wind Turbines Technology review.** 2005.

— **Urban Wind Turbines Guidelines for Small Wind Turbines in the Built Environment.** 2007.

RAGHEB. **Wind Turbines in the Urban Environment.** University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.