

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**PROCEDIMENTO PARA PROSPECÇÃO DE POTENCIAL  
EÓLICO COM AUXÍLIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO  
GEOGRÁFICA**

**Priscila Mayara Duarte dos Santos**

**Itajubá, Dezembro de 2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Priscila Mayara Duarte dos Santos

PROCEDIMENTO PARA PROSPECÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO  
COM AUXÍLIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências e Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Orientador: Professor Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Dezembro de 2015

Itajubá

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelas conquistas diárias que Ele me proporciona. Por me amparar sempre e por ter me oferecido essa oportunidade. Ao Senhor toda honra e toda glória!

Agradeço ao meu esposo Gedeon, pela torcida, incentivo e apoio, que foram fundamentais para a realização de mais essa etapa em minha vida. Você foi fundamental para a conclusão desse mestrado, obrigada meu amor!

Aos meus pais, minhas irmãs, sobrinhos e toda minha família por estarem ao meu lado, vibrando por cada novo passo conquistado.

Ao professor Tiago pela orientação, apoio e confiança, durante esse processo. Muito obrigada pela oportunidade.

Aos amigos, principalmente ao pessoal do CERPCH, por toda vivência e oportunidades compartilhadas, pelo aprendizado e pelos momentos de descontração. Vocês fizeram com que o caminho do mestrado ficasse mais leve. Valeu pessoal!

À Universidade Federal de Itajubá, foi uma honra estudar nessa instituição.

À CAPES, pelo apoio financeiro, que foi muito importante para a dedicação na realização desse mestrado. Obrigada!

*“Bem-aventurado todo  
aquele que teme ao Senhor e  
anda nos seus caminhos.”*

Salmos 128.1

## RESUMO

Como a geração de energia no Brasil está cada vez mais diversificada, novas fontes de energia ganham espaço, como por exemplo a energia eólica. Desta forma novas ferramentas são utilizadas para melhorar cada vez mais o aproveitamento do vento para a produção de energia. O estudo apresentado nessa dissertação tem o objetivo de descrever o procedimento de prospecção de potencial eólico de uma região, utilizando ferramentas de extrapolação do vento e de probabilidade estatística, que podem auxiliar em uma etapa inicial de elaboração de um projeto. A aplicação do modelo consiste no emprego de dados de entrada sobre a velocidade do vento, e foram utilizados os disponibilizados pelo atlas e as estações meteorológicas instaladas nessas áreas. A verificação do potencial eólico deu-se em três regiões de estudo de caso, e são apresentadas com a intenção de desmistificar a complexidade de análise do vento no sentido de aproveitamento energético. A distribuição utilizada é a de Weibull, que é modelada pelos parâmetros  $k$  e  $c$ , que são os fatores responsáveis por caracterizar o vento para cada região. Como forma de verificar a qualidade da distribuição estatística como ferramenta inicial de identificação do potencial eólico quando utilizados como dados de entrada os valores referentes as informações contidas nas estações meteorológicas e do atlas, buscou-se comparar os resultados com dados reais de parques eólicos inseridos nessas regiões. O que permitiu a análise do desvio entre os resultados obtidos pela aplicação da metodologia de prospecção, para a velocidade do vento e do fator de capacidade, com os valores de referência. Desta forma, como resultados apresentados nesse estudo tem-se a descrição do modelo de prospecção de potencial eólico, a comparação entre os resultados obtidos desse modelo e os dados reais, e as possíveis causas dos desvios entre esses valores.

**Palavras chaves:** Distribuição de Weibull, prospecção de potencial eólico, energia eólica, desvio.

## ABSTRACT

As power generation in Brazil is more and more diversified, new energy sources are gaining space such as wind power. Thus, new tools are used to improve increasingly wind exploitation for power generation. The study presented in this thesis aims to describe the procedure for wind power capacity of a region, by using tools for wind extrapolation and statistics probability, which may assist in an initial stage for achieving a project. The application of the model consists in using entry data on wind speed, and were used those available in atlas and weather stations operating in mentioned areas. Verification of wind power capacity was performed in three regions of study case and are showed with the purpose of clearing out the complexity of wind analysis concerning power exploitation. The distribution used is Weibull one, which is tailored by parameters  $k$  and  $c$  which are the factors responsible to characterize wind of each region. As a way to verify the statistical distribution quality as initial tool for identifying wind power capacity when values regarding included information in weather stations and atlas are used as entry data, we intended to compare results with real data of wind power farms operating in those regions. This permitted variance analysis between results obtained by prospection methodology application, for wind speed and capacity factor, as reference values. Thus, as results presented in this study, we have description of wind capacity prospection model, comparison between results obtained in this model and real data, and possible causes of variance between such values.

Key words: Weibull distribution, wind power capacity prospection, wind power, variance

## Lista de Figuras

Figura 1: Construção de Parque eólico em Xinjiang, China. (BBC Brasil).....	24
Figura 2: Capacidade eólica instalada no Brasil (Fonte: Aneel/ABEEólica).....	27
Figura 3: Valores dos preços praticados nos leilões de energia eólica. (Cenários Energia Eólica, 2015) .....	28
Figura 4: Efeito das massas de ar para formação do vento. (Martins et al., 2008).....	30
Figura 5: Partes constituintes de uma turbina eólica. (CBEE / UFPE. 2000). ....	35
Figura 6: (a,b) Aerogerador de eixo horizontal. Fonte: Enercon e Skystream e (c) Força de sustentação. (Fonte: Cresesb). ....	36
Figura 7: Sentido de rotação de acordo com a configuração do eixo do aerogerador. (Cresesb) .....	36
Figura 8: Força de arrasto resultante da Força do vento que incide sobre a pá da turbina. (Cresesb) ...	37
Figura 9: Relação velocidade específica e coeficiente de potência.....	38
Figura 10: Sistema eólico isolado da rede. (Dutra, 2009) .....	39
Figura 11: Sistema conectado à rede do SIN. (Carbon Trust).....	40
Figura 12: Curva de potência de um aerogerador de 3MW. (Catálogo Vestas).....	45
Figura 13: A influência do perfil vertical do vento. (Salvador, 2010) .....	53
Figura 14: Função Gama para diferentes valores de k. ....	60
Figura 15: Distribuição de Weibull para diferentes valores de k. (Castro, 2005) .....	62
Figura 16: Comparação entre os valores de fator de forma na região para as diferentes alturas. ....	64
Figura 17: Comparação de k1 e ajuste par k2 na altura h2. ....	64
Figura 18: Curva da função de ocorrência de Weibull para a velocidade média do vento de 7 m/s.....	66
Figura 19: Curva de Potência do aerogerador de 800 kW .....	66
Figura 20: Curva de $F(v) * P(v)$ . ....	67
Figura 21: Variáveis temáticas inseridas no ARCGIS® para detalhamento dos mapas de potencial eólico. (Fonte: Polizel,2007) (Adaptado de Polizel, 2007). ....	72
Figura 22: Média da velocidade do vento por estação do ano a uma altura de 50 metros na região de Camocim. (Cresesb).....	74
Figura 23: Região de Camocim, utilizada para a aplicação do modelo de prospecção do potencial eólico. (Google Earth).....	75
Figura 24: Região da Central Eólica de Beberibe, utilizada para a aplicação do modelo de prospecção do potencial eólico. ( Google Earth) .....	76
Figura 25: Médias de velocidade do vento por período do ano a altura de 50 metros. (Cresesb).....	77
Figura 26: Média da velocidade do vento por estação do ano a uma altura de 50 metros na região de Paracuru. (Cresesb) .....	78

Figura 27: Região de Paracuru, utilizada para a aplicação do modelo de prospecção do potencial eólico. (Google Earth).....	78
Figura 28: Mapa para a velocidade do vento na região de Camocim. ....	81
Figura 29: Mapa de velocidade do vento na região da CE Beberibe. ....	82
Figura 30: Velocidade do vento na região de Paracuru.....	83
Figura 31: $F(v)P(v)$ médio na região de Camocim.....	84
Figura 32: Fator de capacidade anual na região de Camocim.....	85
Figura 33: FC no inverno na região de Camocim. ....	86
Figura 34: FC no outono para a região de Camocim. ....	86
Figura 35: FC na primavera a região de Camocim. ....	87
Figura 36: FC no verão na região de Camocim.....	87
Figura 37: $F(v)P(v)$ média da região. ....	88
Figura 38: Fator de capacidade anual na região. ....	89
Figura 39: Fator de capacidade anual médio na região do parque eólico instalado. ....	90
Figura 40: FC no verão na região de Beberibe.....	90
Figura 41: FC na primavera na região de Beberibe.....	91
Figura 42: FC no inverno na região de Beberibe. ....	91
Figura 43: FC no outono na região de Beberibe. ....	92
Figura 44: Densidade de potência média para a região de Paracuru.....	93
Figura 45: FC anual na região de Paracuru. ....	94
Figura 46: FC no inverno na região de Paracuru.....	94
Figura 47: FC no outono na região de Paracuru.....	95
Figura 48: FC na primavera na região de Paracuru.....	95
Figura 49: FC no verão na região de Paracuru.....	96
Figura 50: Desvio Padrão dos dados das estações utilizadas na prospecção de Paracuru.....	99



## Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores do expoente de potência do local para diferentes superfícies (Población,2012).....	54
Tabela 2: Função Gama (Fonte: Atlas eólico de Minas Gerais) .....	60
Tabela 3: Quadro das alturas de extrapolação.....	79
Tabela 4: Cálculo do Erro relativo entre as velocidades do vento: .....	97
Tabela 5: Cálculo do erro relativo para os valores de Fator de Capacidade. ....	97
Tabela 6: Fator de Capacidade para um único ponto no local próximo a localização dos parques eólicos em operação. ....	98

## Sumário

Lista de Figuras .....	VII
Lista de Tabelas.....	IX
1. Capítulo .....	14
1.1 Introdução .....	14
1.2 Justificativa e relevância .....	18
1.3 Objetivos .....	19
1.3.1 Objetivo Geral.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Revisão Bibliográfica.....	20
2.1 História da Energia Eólica.....	20
2.2 Energia eólica no Mundo .....	21
2.3 Políticas mundiais para incentivo à energia eólica.....	23
2.3.1 Energia eólica na China.....	23
2.3.2 Energia eólica nos Estados Unidos .....	24
2.3.3 Energia eólica no Brasil .....	25
2.4 Aproveitamento de Energia Eólica como Energia Elétrica.....	29
2.4.1 A formação dos ventos.....	29
2.5 Velocidade e direção do vento .....	31
2.6 O vento como fonte de eletricidade.....	31
2.6.1 Turbinas eólicas.....	34
2.7 Sistemas de geração de energia eólica .....	38
2.7.1 Sistemas de pequeno porte .....	38
2.7.2 Sistemas de grande porte.....	40
2.8 Parques eólicos.....	40
2.8.1 Características dos parques eólicos .....	41
2.8.2 Parques eólicos e o meio ambiente.....	43
2.8.3 Parques eólicos e a interação com a sociedade .....	44
2.8.4 Considerações técnicas dos parques eólicos .....	44

2.8.5	Potência Eólica.....	46
2.9	Perfil de velocidade do vento .....	47
2.10	Materiais.....	49
2.10.1	Dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro .....	49
2.10.2	Dados das estações meteorológicas.....	50
2.10.3	Dados dos parques disponibilizados pela ANEEL e de registros de parques eólicos ....	50
3.	Metodologia .....	51
3.1	Extrapolção vertical.....	51
3.1.1	Lei exponencial de Helman ou Lei da Potência .....	51
3.2	Distribuição de Probabilidades.....	54
3.3	Distribuição de Weibull .....	55
3.3.1	Parâmetros k e c .....	58
3.4	Estimativa da Energia Gerada por um sistema eólico.....	65
3.5	Fator de Capacidade.....	68
3.6	Métodos utilizados no tratamento dos dados de prospecção.....	69
3.6.1	Tratamento dos dados prospectados.....	69
3.7	Interpolação IDW .....	70
3.8	Ferramentas de SIG.....	71
4.	Contextualização das regiões de estudo .....	73
4.1	Determinação das regiões para estudo de caso .....	73
4.1.1	Região de Camocim .....	74
4.1.2	Região de Beberibe .....	75
4.1.3	Região de Paracuru.....	77
5.	Resultados .....	79
5.1	Resultados do método de prospecção.....	79
5.2	Análise da Velocidade do vento na região dos parques eólicos.....	80
5.2.1	Região de Camocim .....	81
5.2.2	Região de Beberibe .....	81
5.2.3	Região de Paracuru.....	82

5.3	Análise do Fator de Capacidade na região dos parques eólicos.....	83
5.3.1	Região de Camocim .....	84
5.3.2	Região de Beberibe .....	88
5.3.3	Região de Paracuru.....	92
5.4	Cálculo do erro relativo entre os dados: Comparando os resultados da prospecção e dos registros dos parques eólicos.....	96
6.	Análises e conclusões dos resultados .....	100
7.	Referências Bibliográficas .....	103
	ANEXO A.....	113
	ANEXO B .....	115
	APÊNDICE A .....	118

# 1. Capítulo

## 1.1 Introdução

Na década de 70, precisamente a partir do ano de 1973, instalou-se a maior crise relacionada ao petróleo no mundo, o que conseqüentemente atingiu o Brasil e abriu o mercado energético para um período de mudanças. A crise foi ocasionada basicamente devido ao aumento do preço do barril e, em função da diminuição da produção ocasionada pelas guerras entre os países árabes. Essa crise trouxe ao Brasil fatores perturbadores que alteraram de forma significativa o panorama da eletricidade, gerando uma tendência maior de busca por sistemas com maior confiabilidade e independentes das fontes empregadas naquela época (Polizel, 2007).

A energia eólica não ganhou espaço apenas devido à necessidade energética causada pela crise dos anos 70, mas sim pela intenção em se gerar eletricidade através de processos cada vez mais limpos. Assim, a energia eólica por ser uma fonte limpa, confiável e viável, entrou no mercado pelo destaque em ser além de uma alternativa energética, uma solução para contribuir com a economia mundial sustentável e o objetivo comum de atender a demanda de consumo energética (Silva, 2013). Ela se apresenta como uma alternativa interessante por não denegrir o ambiente e ser dependente de um recurso inesgotável, assim passou a ser utilizada como forma de complementariedade a outras fontes, o que proporcionou seu desenvolvimento e o seu crescimento na matriz. Atualmente sua participação é de cerca de 8% na matriz, porém com projeções de crescimento para 22 % até o ano de 2023, isso de acordo com os dados disponibilizados no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2023, 2015).

O Brasil combinando esses objetivos comuns, o de gerar eletricidade para suprir a demanda, sem que os processos energéticos gerem impactos na vida e ao meio ambiente, vem abrindo espaço para essas novas alternativas de geração, através das fontes dependentes de recursos naturais disponíveis no território nacional. Apesar dos recursos naturais já serem utilizados, como por exemplo, na exploração hidráulica, através do grande número de hidrelétricas instaladas no país, não é viável que se dependa apenas de um combustível para geração, em razão de alguns períodos de secas. A utilização de uma alternativa para esses períodos está atualmente em discussão, e sabe-se que outras fontes renováveis podem ser uma boa opção, como a eólica devido ao vasto potencial disponível em território nacional.

A utilização de fontes renováveis é importante por auxiliar o crescimento do país no setor mundial e, ainda por contribuir para que o Brasil coopere com os tratados internacionais

por um meio ambiente livre de emissões de gases ou impactos que possam contribuir com as modificações climáticas no planeta e com o aquecimento global. Atualmente formam-se bases para a geração de energia considerando a natureza técnica do empreendimento, estratégica, política, economia e o caráter ambiental, para que se libere os projetos para a geração de eletricidade (Polizel, 2007).

Com essa crescente participação no mercado e a mudança do cenário energético com o passar dos anos, novas tecnologias e políticas foram integradas as fontes alternativas, para que se tornassem ambientalmente viáveis e apresentassem maior rendimento. A energia eólica passou a se consolidar em um contexto técnico como uma tecnologia madura e preços bastante competitivos (Melo, 2012), que impulsionam o crescimento da geração elétrica através dos ventos.

O Brasil é um país privilegiado pelo vento, e existem regiões com favorecimento geográfico e abundância de vento, como no Nordeste brasileiro que contribui para que o setor cresça no país e, ainda gera novos meios de economia nas regiões, sem contar que devido ao volume de energia gerada, essas áreas despontam como maiores geradoras de energia dos ventos no Brasil (Melo, 2013). Em razão desse quadro favorável, os maiores empreendimentos eólicos estão localizados nos estados do Nordeste, com destaque principalmente para estados como o Ceará e o Rio Grande do Norte. Existem ainda alguns empreendimentos localizados fora do grande polo de geração eólica como é o caso dos projetos instalados em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul.

No contexto, do desenvolvimento de ferramentas que venham a contribuir com a energia eólica e seu crescimento no Brasil, existe a constante tentativa de evolução do processo de geração de energia através dos ventos. As ferramentas podem ir, desde o desenvolvimento de equipamentos até o estudo e análise de métodos e metodologias, que auxiliem nos ajustes para as etapas de projeto e contribuam para a expansão do cenário no Brasil.

Justus et al. (1976) é destaque nos estudos para o levantamento do potencial eólico e foi pioneiro na identificação da potencialidade contida no movimento das massas de ar, através da aplicação de um modelo matemático de avaliação estatística do vento. O modelo proposto na época permitiu que os dados de ventos fossem ajustados e, as ferramentas probabilísticas contribuíssem diretamente para o desenvolvimento de metodologias para a determinação de potencial eólico em uma dada região. Essa determinação garantiu para que a avaliação do potencial eólico favorecesse o levantamento da energia estimada para geração, e o desenvolvimento dos parâmetros de verificação do rendimento de um projeto eólico em

operação. A avaliação do potencial eólico no território nacional, pode se tornar inicialmente um processo de maciça carga de trabalho e demandar esforços financeiros significativos, desta forma quando se estuda um meio para auxiliar no processo inicial da identificação das áreas mais propensas para a geração de energia eólica, podem-se reduzir gastos e o tempo dispensado na etapa inicial de verificação do potencial eólico disponível.

As ferramentas utilizadas no processo de prospecção consistem em verificar e identificar teoricamente qual a disponibilidade da velocidade do vento do local, e sua potencialidade teórica em converter energia eólica em energia elétrica. Além disso, a identificação das áreas de melhores velocidades do vento e análise do fator de capacidade (FC) como parâmetro de rendimento eólico na região, podem indicar de forma primária os pontos onde um empreendimento retorna o melhor aproveitamento e assim fornecer uma etapa inicial de filtragem, onde os melhores pontos para aferições anemométricas e certificação de potencial prospectado, serão apontados.

O processo de prospecção pode ser utilizado como ferramenta para verificação do potencial teórico de um futuro parque eólico e, indicar o cenário de geração que poderá ocorrer de acordo com a disponibilidade de vento no local. Esse processo de prospecção é também utilizado em pequenos sistemas de geração, para a verificação do fator de capacidade que poderá ser alcançado e utilizado para auxiliar no cálculo de projeto do sistema. De acordo com Silva et al. (2002) a identificação do potencial eólico de um dado empreendimento característico em uma localidade é fundamental e, tem como requisito básico a observação da velocidade e direção do vento em uma altura adequada, para que o projeto seja dimensionado para o maior aproveitamento possível.

De acordo com Silva (1999) existem várias possibilidades de aplicação da energia eólica, por ela permitir a utilização de sistemas isolados ou empreendimentos de grande porte. E por isso os estudos que contemplam essa fonte, somam vantagens para o uso dessa energia em busca de maior rendimento dos sistemas, sem que ocorram danos ao ambiente, e auxiliando na identificação das possíveis áreas para geração e a quantificação dos recursos eólicos (Lima et al., 2010). O meio de verificar se os resultados obtidos são válidos, ou melhor, o erro embutido no estudo de prospecção, é comparar os dados resultantes da aplicação da metodologia de prospecção com informações reais, como as de operação de parques eólicos.

Os valores de operação das fazendas são disponibilizados periodicamente pelos órgãos responsáveis, por exemplo, a ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica) e a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), através de relatórios informativos. Já os valores teóricos são

obtidos através de simulações numéricas baseadas em métodos matemáticos, que englobam modelos de probabilidade estatística e de extrapolação de dados, e ainda devido a metodologias de avaliação da probabilidade de ocorrerem bons ventos em uma área.

Especialistas assinalam que os empreendimentos podem reduzir gastos, baseados nas investigações sobre o potencial contido nos ventos, e conseqüentemente sobre a quantificação dos recursos eólicos de uma determinada região (Cunha, 2006), com isso a aplicação teórica de prospecção de potencial busca contribuir com esse cenário. A literatura indica que o desafio dos estudos realizados para quantificar a energia e a potência elétrica gerada pelos ventos em uma determinada área, estão diretamente relacionados aos ajustes e aplicação da distribuição estatística aos dados de velocidades do vento, observados na região (Sansigolo, 2005) e, com a determinação dos seus parâmetros. É necessário verificar as velocidades das massas de ar ao longo das estações do ano e de acordo com a altura, pois a caracterização do potencial eólico configura-se entre os primeiros passos para um projeto eólico de geração de energia (Petry, 2007).

O modelo matemático utilizado para a prospecção, primeiramente necessita da coleta de dados em bancos de informações, da velocidade sazonal média do vento e a utilização de um método estatístico baseado no modelo probabilístico acerca da velocidade do vento (Silva, 2013). Esse modelo pode consistir em várias formas de distribuições estatísticas, entre elas a distribuição de Weibull, que permite o cálculo do fator de capacidade e da energia prospectada no local de cada amostra de vento. Desta forma, esse trabalho utiliza dados de vento disponíveis em bancos de informações meteorológicas e tem o objetivo principal de apresentar e aplicar a metodologia de prospecção como ferramenta de identificação inicial do potencial eólico de uma área.

O cálculo da velocidade média do vento e a verificação estatística de ocorrer esses valores, são importantes características para avaliar as condições técnicas de geração e o aproveitamento eólico para um determinado local (Petry, 2007), e desta forma a ferramenta de prospecção é utilizada como instrumento inicial de verificação dos fatores que modelam uma determinada área e permitem a identificação primária de qual seria o volume de energia e fator de capacidade que esse local pode alcançar teoricamente.

Após a demonstração da ferramenta de prospecção, busca-se com esse trabalho identificar qual a precisão dos dados teóricos obtidos como resultado do estudo, e para tanto, comparou-se os valores teóricos resultantes da prospecção com os valores reais de registros em parques eólicos inseridos nas áreas de prospecção. Além disso, essa ferramenta tem o intuito de



proporcionar a verificação do possível fator de capacidade para um projeto em operação. O processo de implantação de um empreendimento eólico requer uma avaliação dos condicionantes para determinar o melhor ponto de aproveitamento do vento, e para isso, deve-se considerar a energia possível de ser gerada (Petry, 2007), e portanto esse estudo vem auxiliar a avaliação inicial para indicar se a energia eólica disponível é suficiente para se obter um FC significativo nas regiões.

Nesse sentido, a aplicação do modelo de prospecção de potencial eólico utilizando como base estatística a distribuição de Weibull, busca permitir a verificação através de 3 estudos de casos, se há desvio embutido na metodologia e assinalar as possíveis causas que possam interferir nos resultados.

## **1.2 Justificativa e relevância**

A motivação para o desenvolvimento desse estudo é a importância da utilização de ferramentas iniciais em projetos de geração de energia, para que os esforços técnicos e financeiros sejam aplicados de forma direcionada, durante a elaboração dos empreendimentos.

É importante expandir as pesquisas relacionadas à implementação e análises sobre a geração de energia através dos ventos, porque quanto maior o número de ferramentas associadas às etapas dos projetos e que possam auxiliar na identificação do potencial, maiores são as oportunidades dos sistemas oferecerem um fator de capacidade satisfatório. Esse estudo tem como motivação colaborar com a expansão dos estudos em energia eólica no país, oferecendo e apresentando uma ferramenta para identificação primária do potencial disponível em uma determinada área, de acordo com o vento no local.

Essa ferramenta pode auxiliar na tomada de decisão, funcionando como filtro inicial no processo de desenvolvimento de um projeto voltado a exploração do vento. Busca-se identificar e descrever um instrumento teórico que auxilie na tomada de decisão ligada a instalação de aerogeradores, de forma que o mapeamento prévio acerca da demanda possível de ser gerada possibilite a análise dos principais índices ligados ao aproveitamento da energia eólica, utilizando o procedimento de prospecção do potencial disponível baseado em método estatístico.

Aplicando a metodologia de prospecção descrita nesse estudo busca-se ainda, verificar o quão próximo os valores teóricos podem estar dos índices reais. Essa comparação é possível através do estudo em regiões onde existem empreendimentos em operação e, portanto, sabe-se qual é o fator de capacidade que a região é capaz de fornecer.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O objetivo dessa pesquisa é descrever uma ferramenta para prospecção de potencial eólico, que pode ser utilizada na avaliação inicial da viabilidade técnica relacionada a implementação de projetos de geração de energia eólica. É modelada por um procedimento matemático probabilístico para verificação estatística do potencial disponível.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

O trabalho sobre o modelo de prospecção de potencial eólico pretende apresentar as etapas do procedimento de prospecção e aplicar a ferramenta em áreas onde existam parques eólicos em operação, com a finalidade de verificar qual a precisão dos valores do fator de capacidade e de potencial de geração teórico em comparação aos valores reais de registros desses parques.

Podem-se listar ainda como objetivos da pesquisa os seguintes itens:

- Contribuir com os estudos de geração de energia a partir dos ventos.
- Descrição da metodologia de estimativa de fator de capacidade e energia gerada através da ferramenta de prospecção.
- Apresentar o modelo de prospecção de vento.
- Verificar o comportamento do procedimento de prospecção e do potencial de energia eólica em 3 regiões através de *cases*.
- Comparar os resultados teóricos com os dados reais.
- Apresentar os aspectos importantes para a utilização dessa metodologia.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1 História da energia eólica**

De acordo com Lopez (2012) os moinhos foram os primeiros equipamentos movidos pelo vento de que se tem conhecimento e, já eram utilizados com a finalidade de moer grãos na Pérsia desde o século 7. Existem registros que indicam que por volta de 2800 a.C. os Egípcios utilizavam a força do vento para movimentar os barcos a vela dos escravos e ainda auxiliar nas tarefas que necessitavam de trabalho mecânico, como o bombeamento de água e de moinhos (Dionísio, 2013; Reis et al., 2007). Registros históricos apontam que as primeiras embarcações a vela foram utilizadas pelos gregos e posteriormente pelos romanos, para atravessar o Mar Mediterrâneo.

Nos anos posteriores a 200 a.C. quando os Persas começaram a utilizar o vento para atividades mecânicas, seguiu-se um período de desenvolvimento, até que por volta do ano de 700 d.C. construíram os primeiros moinhos de vento de alturas elevadas e de eixos verticais, com a finalidade de utilizarem essas máquinas para exercerem a força necessária na moagem dos grãos. Algumas civilizações do Oriente Médio deram continuidade ao desenvolvimento dessa técnica, construindo maiores moinhos e em maior quantidade. Esses moinhos chegaram ao mundo Islâmico e passaram a ser utilizados por muitos séculos seguintes. A partir do século 12, há registros que países da Europa passaram a utilizar o vento como fonte de energia mecânica principalmente na França, Inglaterra e Holanda (Silva, 1999). Como existia uma grande movimentação devido as cruzadas ocorridas na época, sabe-se que a difusão da utilização dos moinhos de vento por toda Europa deu-se por conta disso, e passaram a ser largamente utilizados (Azevedo Ferreira, 2011).

Segundo (Lopez, 2012), a característica comum aos moinhos utilizados na Europa na época era o eixo horizontal de quatro a oito pás de madeira que apresentavam de 3 a 9 metros, e eram formados por vigas cobertas por telas ou placas de madeira e a energia mecânica gerada da movimentação do eixo pelo vento era transferida por caixas de engrenagem para as máquinas instaladas na base do sistema. Além da utilização da energia dos ventos como energia mecânica para a moagem de grãos, sistemas mais eficientes para bombear água foram criados e a partir da metade do século passado passaram a ser modernizados, principalmente nos Estados Unidos, que desenvolveram um sistema inicial de 1HP para o bombeamento de água de regiões mais distantes (Silva, 1999).

Os holandeses também diversificaram a aplicação dos moinhos que além da moagem de grãos, drenagem de terra e bombeamento de água, investiram em estudos que permitissem a produção de óleo vegetal com o auxílio da força do vento. O primeiro moinho construído para a produção de óleo vegetal na Holanda foi em 1582, e desencadeou a utilização desses sistemas para outras finalidades, como em 1586, para a produção de papel. E assim, com a expansão das atividades relacionadas aos sistemas movidos a vento, no final do século 19 já existiam cerca de 9000 moinhos em funcionamento no país, além dos vários outros instalados na Europa inteira, como na Inglaterra que já contava com 10000 equipamentos em funcionamento (Lopez, 2012).

Mesmo com todo crescimento na utilização dos moinhos de vento, no século XIX ocorreu a Revolução Industrial, que trouxe a máquina a vapor e assim deu início ao declínio da utilização do vento na Holanda e na Europa em geral. Com o intuito de reacender a energia eólica e alavancar os moinhos de vento, os europeus passaram a investir em novos conceitos, o que acarretou na criação de uma sociedade, por volta de 1920, para a conservação e melhoria para utilização mais efetiva dos moinhos de vento (Dutra, 2001).

Com o desenvolvimento tecnológico crescente e devido às mudanças que a época impôs no século XX, passou-se a utilizar o petróleo como principal fonte de energia, diminuindo a participação do vento para realizar as atividades. Assim, estudiosos passaram a pesquisar a exploração do vento para outra finalidade, considerada mais nobre, a de gerar eletricidade. Um desses estudiosos foi o engenheiro norte-americano Palmer Putman, que elaborou uma turbina eólica de 30 metros de altura e com pás de 53 metros, construído na cidade de Green Mountains nos Estados Unidos (Leite, 2013).

Os Estados Unidos investiram principalmente em aerogeradores de pequeno porte, diferente de alguns países como a Rússia e a França que direcionaram pesquisas para os sistemas de médio e grande porte conectados à rede de eletricidade. Devido ao interesse em sistemas maiores, no ano de 1929 a França construiu o primeiro aerogerador de grande porte, que tinha 20 metros de diâmetro e com a característica diferenciada de ser composto por duas pás (Parizotto, 2014).

## **2.2 Energia eólica no mundo**

O mundo atualmente passa por um período de transformação energética, juntamente com um momento de crescimento na demanda de consumo. Isso devido ao aumento de poder aquisitivo da população, o que acarreta na melhoria dos padrões de vida principalmente nos

países desenvolvidos e em desenvolvimento (Martins et al., 2008). O novo cenário energético criado, causa crescente preocupação e necessidade de políticas públicas baseadas em iniciativas de planejamento, para que os países, principalmente os emergentes, sejam capazes de satisfazer o grau de demanda de consumo utilizando preferencialmente fontes de energia consideradas limpas.

Com o crescimento da necessidade energética mundial surgem dois grandes impasses e que abrem um leque de novas oportunidades e possibilidades de negócios, como o fato de alguns países apresentarem escassez de recursos para a geração de eletricidade, e ainda a preocupação global de que os processos industriais e de produção de energia sejam os mais limpos possíveis, para que o ambiente não sofra agressões e para que os índices estabelecidos em tratados mundiais sejam respeitados, como os de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto, criado em 1997 (MMA, 2015) pelas Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas e de combate ao efeito Estufa (Rahman; Kirkman, 2014). O MDL foi uma forma de incentivo com a finalidade de alcançar reduções significativas das emissões de gases causadores do efeito estufa, por parte dos países desenvolvidos e países em desenvolvimento, obrigando-os a adotarem políticas nacionais para que as reduções de dióxido de carbono na atmosfera sejam significativas e atinjam níveis próximos aos de 1990.

Desta forma, mesmo que hajam fatos históricos, como a crise do petróleo que impulsionou o crescimento das fontes de energias renováveis no mercado, existe um apelo maior: o de preservação ambiental e de sustentabilidade nas matrizes energéticas pelo mundo. Isso faz com que a busca por projetos maiores e mais limpos para atender as demandas sejam implementados, como por exemplo, a Usina Hidrelétrica de Três Gargantas que é a maior hidrelétrica do mundo, localizada na China e que somente no ano de 2014 evitou a emissão de 100 milhões de toneladas de dióxido de carbono, e também as usinas eólicas em operação no Brasil que ao todo no mesmo ano evitaram a emissão que equivale ao conteúdo poluente de 1,5 milhões de automóveis, através de aproximadamente 391.339 toneladas de CO<sub>2</sub> evitados (ABBEólica, 2015).

A redução na emissão desses gases implica na criação de um banco de créditos no mercado de carbono, que indica que quanto menor for o volume de poluentes emitidos na atmosfera, maior é o valor econômico atrelado ao país envolvido, o que gera um mercado de valores monetários de compensação (Karki, 2006). Esse mercado de compensação permite aos países a negociação dos créditos, o que torna flexível o nível de emissão de gases, pois quando ocorre à extrapolação dos níveis firmados pelas Nações Unidas pode-se utilizar os créditos de

outros países. Isso pode ocorrer em razão do crescimento industrial e também do desenvolvimento constante dos países, que podem oscilar de ano para ano.

Segundo Karki (2006), a energia eólica é a principal forma de geração para auxiliar os países que estão comprometidos com as reduções dos gases de efeito estufa, isso porque os sistemas de maior capacidade de geração, utilizam principalmente recursos nucleares, fósseis e gás natural, e podem a longo prazo apresentarem empecilhos e escassez, abrindo espaço para a energia dos ventos como fonte de manter organizado o quadro dos tratados ambientais e econômicos dos países. Assim, a energia eólica torna-se uma das principais fontes do mundo, por apresentar um perfil limpo e por oferecer uma geração de energia associada a benefícios ambientais quando comparada às demais fontes, além de ser favorecida com políticas de desenvolvimento e facilidade na instalação em diversas partes do mundo.

Conforme Lopez (2012), “O pensamento ambiental tem muito a ver com aquela responsabilidade social: o objetivo mais propagado é a sobrevivência da humanidade, dependente da natureza à qual pertence. Conservar o meio ambiente é uma forma de valorizar o homem em todos os aspectos, desenvolvendo condições a qualidade de vida”. Desta forma, a energia dos ventos se solidifica como um processo que busca conservar o meio ambiente, por apresentar o objetivo de depender da natureza onde está inserida, sem interferir diretamente nos sistemas naturais, atendendo ao desenvolvimento natural e de qualidade de vida e preservação dentro dos itens estabelecidos para o crescimento sustentável da população.

## **2.3 Políticas mundiais para incentivo à energia eólica**

### **2.3.1 Energia eólica na China**

A China é a primeira no ranking mundial de energia eólica e pretende em seis anos dar o maior impulso já visto em energias renováveis, dobrando o número de equipamentos aerogeradores, e que irão intensificar os investimentos no setor de geração eólica. A atual capacidade de energia proveniente dos empreendimentos eólicos instalados no país, chega próximo de 75 GW, com pretensões de alcançar até o ano de 2020 a marca de 200 GW instalados. Isso é extremamente significativo, visto que juntos os países da União Europeia têm um montante de 90 GW instalados (BBC). O crescimento da exploração eólica é tão grande no país, que cerca de duas usinas foram instaladas por dia na região de Xinjiang, figura 1.

Em 2009 as tarifas foram reduzidas para o setor de energia eólica, variando na casa de 0,1599 dólares atuais, o que pode ter contribuído como uma variável importante no desenvolvimento desse setor no país. Assim, novas formas de governo serão empregadas com a finalidade de substituir os incentivos anteriores, porém com um impacto não tão intenso quanto as do início de todo o processo de expansão energética. O governo chinês sinaliza que as tarifas de energia para as empresas que construíram projetos após o dia 30 de junho do ano de 2015 poderá ser reduzida de até 11% do valor atual praticado no país.



*Figura 1: Construção de Parque eólico em Xinjiang, China. (BBC Brasil).*

Com o desenvolvimento chinês em energia eólica, novas tecnologias e equipamentos têm sido estudados e incorporados no mercado mundial, tanto que alguns parques são constituídos de aerogeradores 100% chineses. Mesmo com todo crescimento e avanços tecnológicos voltados a geração eólica, a China assim como outros países tanto da América quanto europeus, ainda enfrenta desafios para os próximos anos em relação ao crescimento no número de parques eólicos instalados, um desses desafios está relacionado as conexões de interligação dos parques aos sistemas da rede pública, e a falta de linhas para a distribuição entre os centros geradores e os grandes centros consumidores.

### **2.3.2 Energia eólica nos Estados Unidos**

Os Estados Unidos, a Dinamarca e a Holanda foram precursores dos projetos de geração de energia através dos ventos, e em razão disso se desenvolveram muito rápido nesse setor e são destaques atualmente no cenário mundial. O interesse dos Estados Unidos surgiu desde muito antes da crise mundial de 70, quando ocorreu escassez do principal combustível

utilizado na época, o petróleo. Além da necessidade de se obter uma alternativa energética para o país, houve outros fatores que passaram a impulsionar o desenvolvimento da energia eólica, como as medidas governamentais criadas para incentivar os investimentos que levassem ao desenvolvimento do setor e a consolidação da tecnologia de aerogeradores em seu território.

Em 1978 nos EUA, precisamente no estado da Califórnia, estabeleceu-se um programa de controle para subsidiar os sistemas de geração eólica com tarifas a valores especiais para incentivar a construção de pequenos parques com máquinas de potência nominal de 1,3 MW (Polizel, 2007). Com o estímulo do governo, percebeu-se que o mercado ficava aquecido e que novos setores passaram a produzir peças e equipamentos voltados para os novos sistemas de geração. E desde 2009 novos investidores foram atraídos pelos americanos e, novas políticas de favorecimento às fontes renováveis foram oferecidas pelo governo do Presidente Obama, para apoiar a formação mais limpa da matriz energética norte americana.

Em 2012 o país atingiu uma capacidade de geração de 13,13 MW devido ao grande número de investimentos privados realizados, na ordem de US\$ 35 milhões (Globo Natureza, 2003). Atualmente, sabe-se que os investimentos ainda são crescentes e buscam trazer os programas para mais próximo da sociedade, como o Plano de Energia Limpa da EPA que indica a inserção de novos empreendimentos eólicos nos Estados Unidos, criando um quadro de custos competitivos e que poderá contribuir com a redução de custos com a geração de energia na medida em que o setor cresce. Com isso projeta-se que os consumidores terão uma economia de quase US\$ 280 bilhões até o ano de 2050 e, o investimento total no setor pode alcançar cerca de 70 bilhões de dólares por ano até 2050, para favorecer ainda mais o ritmo de crescimento do setor no país.

### **2.3.3 Energia eólica no Brasil**

O Brasil mesmo que de forma tardia, se comparado ao desenvolvimento em fontes renováveis de outros países, sofreu uma grande transformação ocasionada pela mudança de mercado e a oferta de projetos que fossem mais sustentáveis. Com isso o governo nacional tem aproveitado e investido em sistemas não tão convencionais para a geração de energia, expandindo a participação de outras fontes na matriz energética, como a energia eólica que desde 2008 teve um crescimento de mais de 5 MW de capacidade instalada (Panorama Comerc, 2015). Projeções indicam que até 2020 a energia eólica deva expandir ainda mais, aumentando



em quase 300% esse número (Azevedo, 2015), e certamente irá superar e muito os 8% atuais de participação da matriz energética brasileira (ABEEólica).

Apesar do crescimento e da disponibilidade de potencial eólico presente no país, o Brasil ainda ocupa a 15ª posição no ranking mundial. Mesmo que em 2014 tenha crescido mais em energia eólica que a Alemanha, ainda se explora apenas 7% dos 500GW disponíveis no território nacional (Cresesb). Para aumentar o crescimento do percentual de exploração, o governo busca ações para a internalização da energia eólica, proporcionando o desenvolvimento de estudos e tecnologias nacionais e favorecendo o investimento em novos projetos.

A necessidade da expansão da produção energética está relacionada principalmente ao desenvolvimento do país, que provoca a alta na demanda de energia e, gera a preocupação de que processos de geração de energia não saiam tão caros. Visando as projeções de crescimento e o mercado mundial de energias renováveis, no ano de 2002 o Brasil lançou o primeiro pacote representativo de medidas para tentar alavancar as fontes renováveis entre os investidores locais. Esse pacote recebeu o nome de PROINFA - Programa de incentivo às Fontes Alternativas, que em sua primeira fase promoveu a contratação de 1,1 GW de energia produzidos por cada fonte participante do leilão, são elas: eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas e biomassa. Criado através da Lei nº 10.438 e colocado em prática pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em conjunto com a ELETROBRAS, o programa contou com o BNDES como principal financiador dos projetos (Azevedo, 2015).

O governo brasileiro na época traçou metas de investimentos para que as novas fontes se tornassem atrativas para investidores, e para que também passassem a ser desenvolvidas nacionalmente. As diretrizes do MME para o programa promoveram novos leilões de energia, que podem ter resultado em um crescimento satisfatório na capacidade instalada atual se comparada a 10 anos atrás, como na figura 2, onde indica que desde 2005 cresceu cerca de 300%.

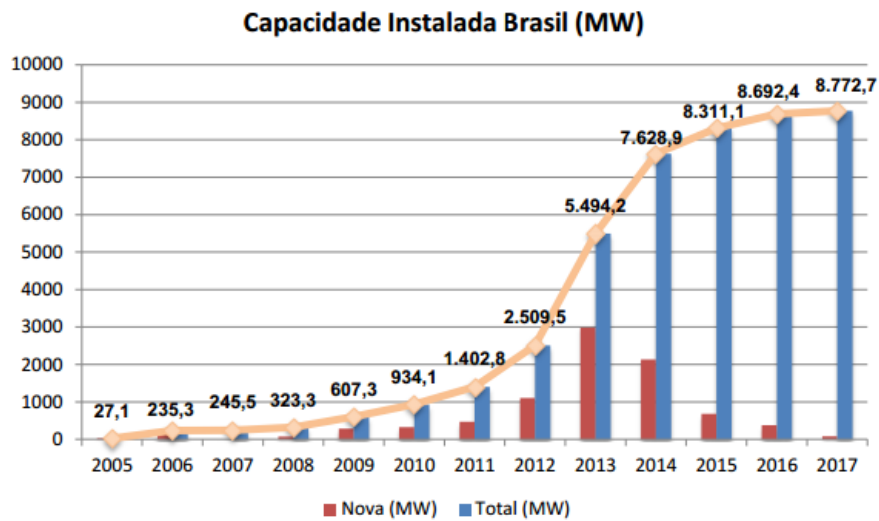


Figura 2: Capacidade eólica instalada no Brasil (Fonte: Aneel/ABEEólica)

O Brasil foi o primeiro país na América Latina a incentivar a utilização de aerogeradores para a geração de energia, através de programas de incentivo que acompanharam o crescimento desse setor tornando-o cada vez mais competitivo. Os estudos mostram que o fator de capacidade médio nacional é cerca de 40%, o que pode ser o principal índice que causa o crescimento no número de parques e investimento em novas tecnologias, com a finalidade de melhorar o desempenho de máquinas para extrair o máximo do vento nacional. Verificando outros países com capacidade instalada representativa no mundo, tem-se que o Fator de Capacidade médio é menor, porém a forma como o recurso natural é explorada apresenta-se mais racional e otimizada do que no Brasil. Como exemplo tem-se o FC chinês que em 2014 apresentou médias próximas a 24%, mas não interferiu no crescimento do país no setor.

A disponibilidade de ventos para a geração de energia no Brasil está relacionada a morfologia e cobertura do solo na extensão de seu território (Frank, 2001). Como o Brasil apresenta características diferenciadas ao longo de suas regiões, existem locais com melhor potencial e disponibilidade de vento para ser explorado, como os estados do Ceará e Rio Grande do Norte. O levantamento da energia estimada e disponível no país atualmente é de 500 GW, muito maior do que o potencial explorado pelas 281 usinas em operação que somadas representam 7,07 GW de capacidade instalada. Além da capacidade instalada existem cerca de 15 GW de projetos cadastrados que ainda estão em construção.

A expansão da energia eólica no Brasil acontece principalmente pela evolução nos preços que se tornaram mais competitivos perante outras fontes. No ano de 2004 o custo médio era de R\$365,56/MW (Cenários Energia Eólica, 2015) e de acordo com o leilão ocorrido no

ultimo outubro de 2014 o custo médio foi de R\$ 144/MWh, uma tendência que ocorreu desde os leilões posteriores ao PROINFA, figura 3.

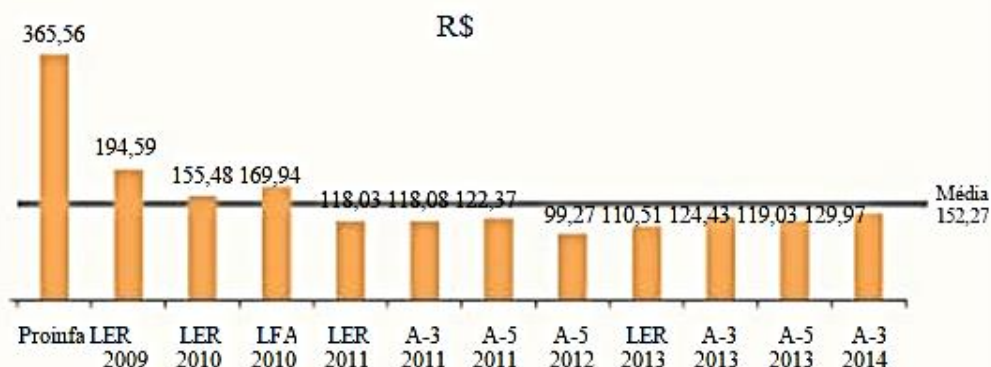


Figura 3: Valores dos preços praticados nos leilões de energia eólica. (Cenários Energia Eólica, 2015)

Além do aumento da capacidade de competitividade da energia eólica no mercado, outro ponto que tem contribuído para a evolução dos empreendimentos é o cunho ambiental e sustentável do processo de geração de energia elétrica. Assim como as hidrelétricas dependem de um recurso natural intermitente, o vento também tem essa característica e com lógica inversa aos períodos com grande representatividade pluviométrica. Esse fato pode ser importante por permitir uma nova alternativa às problemáticas ocasionadas pelas variações do clima que acarretam baixos níveis de águas nos reservatórios, apresentando a possibilidade de utilizar o vento como sistema complementar durante esses períodos. A exemplo disso pode-se citar os dados de geração das fazendas eólicas e a relação com a vazão natural do Rio São Francisco, que de acordo com estudos utilizando séries históricas, possibilitou a verificação de que quando existe o aumento de geração dos sistemas eólicos, o sistema de energia vindo do recurso hidráulico não era o suficiente (Siciliano, 2010), e vice versa, confirmando o caráter de compatibilidade entre a combinação dos sistemas, devido as variações de chuva e vento durante as estações do ano.

A energia eólica além de proporcionar ao Brasil uma alternativa para a garantia da continuidade de fornecimento energético pode ser uma opção para a geração de novos empregos, de mão de obra qualificada e um novo ambiente empresarial que gera rotatividade econômica do setor. Com isso, acredita-se que os novos parques que entrarão em operação nos próximos anos, além de proporcionarem a oportunidade de capacitação profissional irão permitir que o Brasil ocupe posições melhores no *ranking* mundial de produtor de energia limpa. Para melhorar o cenário atual segundo a ANEEL, o objetivo é desenvolver modelos,

analisar o vento e elaborar premissas para que o vento brasileiro seja mais explorado e ao mesmo tempo incentivar a capacitação profissional (Lima, 2010).

Como a intenção brasileira com os programas de incentivos a energia eólica é gerar energia limpa, a abertura do setor e o desenvolvimento acarretam discussões políticas e públicas para verificação dos limitadores do aceleração da inserção de novos empreendimentos ao SIN. Desta forma, novos estudos e pesquisas são realizadas para facilitar a utilização da energia eólica e avaliar o comportamento e os efeitos do crescimento energético dos ventos em outros setores econômicos e sociais do Brasil.

## **2.4 Aproveitamento de energia eólica como energia elétrica**

### **2.4.1 A formação dos ventos**

O vento é o deslocamento de ar na atmosfera, devido a diferença de pressão (Mendes, 2011). Como a temperatura do ar varia com a altura (López, 2010), os ventos são resultado principalmente do aquecimento assimétrico da atmosfera. A energia eólica é uma fonte de energia secundária, proveniente do sol que é a fonte primária, e a incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre é responsável pela diferença de temperatura entre as massas de ar, ocasionando o deslocamento das mesmas e assim a movimentação de ar na atmosfera (Miyashiro, 2013). Essa incidência diferenciada dos raios solares, combinada ao movimento de rotação da Terra tem como produto resultante massas de ar em movimento em diferentes velocidades.

As regiões tropicais, principalmente, recebem raios solares perpendiculares à superfície terrestre, e em função disso são as regiões que apresentam temperaturas superiores. Essas temperaturas superiores favorecem a formação de massas de ar mais aquecidas se comparadas a outras regiões, como os polos. Desta forma, os volumes de massas de ar nas regiões mais quentes são maiores e em razão da densidade, apresentam maior deslocamento do ar, determinando maiores possibilidades de formação do vento. Segundo Mendes (2011) apenas de 1 a 2% do potencial do sol incidente na terra é convertido em vento e como variam em função do tempo e do espaço, essa incidência é diferente em cada localidade do globo terrestre. De acordo com Reboita et al. (2012), no globo terrestre cada região possui características peculiares como latitude, altitude, distância em relação aos oceanos e tipos de superfície, que podem influenciar no tempo e no clima. Essas características são denominadas como fatores ou

controles climáticos e, podem acarretar em áreas que recebam maior radiação solar gerando temperaturas de ar diferenciadas, para diferentes alturas, em diferentes pontos em relação à superfície do planeta, e fazendo com que as massas de ar apresentem pressões distintas devido a irregularidade dos raios solares.

Em relação à circulação geral da atmosfera tem-se os ventos alísios e os ventos de Oeste em latitudes médias, como pode-se observar na figura 4.

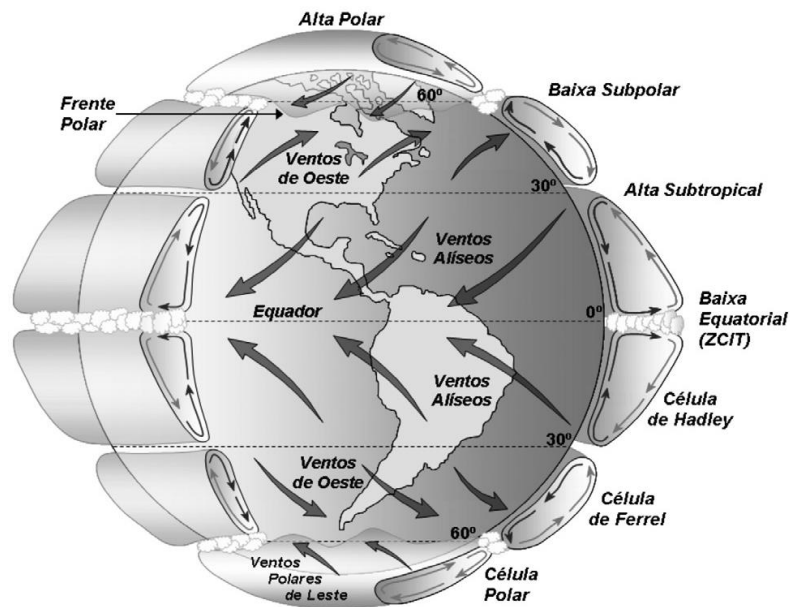


Figura 4: Efeito das massas de ar para formação do vento. (Martins et al., 2008)

A circulação das massas de ar sobre a atmosfera que gera os ventos pode ser de característica global e, considerada como circulação primária ou secundária. Essas são resultantes dos sistemas migratórios de alta e baixa pressão (ocasionados pelas diferenças de temperaturas), e a circulação terciária resultando dos sistemas locais. Considerando que a Terra apresenta uma inclinação de  $23,5^\circ$  em relação ao sol e o plano de sua órbita (Mendes, 2011), as variações sazonais na distribuição da radiação solar sobre a superfície terrestre correspondem na variação da intensidade dos ventos, e a sua duração (Ferraz, 2010). Esses períodos mais intensos de ventos ocasionam o surgimento do movimento de massas de ar continentais ou periódicas, acarretando nas monções ou brisas. As monções são basicamente ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses, e em geral sopram em direções específicas em cada estação do ano. Já as brisas são ventos periódicos que sopram do continente para o mar e também no sentido contrário.

## **2.5 Velocidade e direção do vento**

De acordo com Sentelhas (2007), o vento se desloca de áreas de maior pressão para as áreas de menor pressão, e quanto maior for a diferença de pressão entre essas áreas, maior será a velocidade com que ocorrerá o deslocamento. Além das diferenças de pressões, existe o efeito da rugosidade da superfície da região, criada pelos obstáculos existentes, como a vegetação, o tipo de construções, terrenos montanhosos, e pela distância vertical acima da superfície de referência em que ela é medida.

Sabe-se que o efeito do atrito sobre a velocidade do vento é maior quanto mais próximo da superfície, ocasionando deslocamento do ar e desacelerando o movimento. Quanto maior for a rugosidade da superfície, maior será a influência dela sobre a formação e deslocamento do vento, podendo gerar redemoinhos que são caracterizados por tipos de escoamento turbulento, chamado de caótico. Esses escoamentos aparecem com a interferência de uma força de flutuação térmica que estimula o aparecimento de ventos, e como a superfície que sofre o aquecimento do sol apresenta irregularidades, o movimento do deslocamento vertical interfere na formação dos ventos. A direção do deslocamento do vento muda à medida que se afasta da superfície, devido a diminuição do atrito com a altura.

No Brasil ocorre que a direção e velocidades dos ventos variam conforme a estação do ano. De acordo com Alves et. al. (2011), na primavera a direção predominante é sentido leste, assim como no verão, no outono é a direção sudeste, e nordeste no inverno. Segundo Padaratz (1977), o Brasil devido a sua dimensão continental sofre influência direta ou indiretamente de todas as massas de ar em circulação na América do Sul, e que são responsáveis pelas condições climáticas no continente. Desta forma, os ventos brasileiros são formados pelas massas de ar equatorial atlântica constituída pelos ventos alísios vindos do NE e oriundos das altas pressões nas regiões mais quentes e úmidas do Atlântico. Outra massa de ar que forma os ventos nacionais é a Tropical Continental, que interfere principalmente no verão e é devido à dissolução da frente polar pacífica, assim como a massa equatorial continental que é originada dos ventos alísios do centro de alta pressão que fluem do nordeste e do leste para o centro de menor pressão do continente.

## **2.6 O vento como fonte de eletricidade**

O aproveitamento do vento disponível para geração de energia elétrica depende além da disponibilidade do vento e as características técnicas favoráveis para a exploração, de

incentivos e políticas governamentais para promoverem a utilização do vento como fonte de energia e também tornar os empreendimentos viáveis. O aproveitamento da cinética do vento para a geração de eletricidade depende da conversão do movimento das massas de ar e de fatores que podem influenciar no rendimento das turbinas. A quantidade de energia do vento transferida para o rotor está ligada basicamente aos fatores a seguir:

- Massa específica do ar;
- Densidade do ar;
- Potencial eólico;
- Densidade de potência;
- Área de giro do rotor;
- Velocidade do vento;
- Velocidade de partida e frenagem da máquina;
- Variações da direção do vento.

As turbinas eólicas são posicionadas na camada superficial da atmosfera e podem gerar energia elétrica com ventos a diferentes alturas (Martins et al., 2008). A potência contida no vento é aproveitada através da velocidade do vento contida na área de giro do rotor. Essa relação entre a potência e a área disponibilizada para o aproveitamento energético, é a densidade de potência, e para que tecnicamente a energia eólica seja considerada útil é determinado que esse valor seja superior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , para uma altura de 50 metros e para tanto a velocidade mínima necessária de vento é certa de 7 a 8 m/s (ANEEL, 2012). Desta forma, sabe-se que mesmo que exista vento disponível em diferentes intensidades, o aproveitamento energético dependerá da máquina utilizada e da velocidade do vento no local.

De acordo com a ANEEL, a Organização Mundial de Meteorologia indica que apenas 13 % da superfície terrestre possui vento com velocidade média igual ou maior a 7 m/s na altura de referência de 50 metros, o que indica que as regiões que permitem a utilização do vento em maiores velocidades são restritas. Segundo Júnior (2009), o princípio da energia eólica é que ela pode ser explorada em sistemas isolados, em conjunto com outras fontes e conectada diretamente a rede, as únicas distinções para o dimensionamento e caracterização do empreendimento são as condições climáticas do local, geográficas e a demanda requisitada, ou seja, o vento poderá ser utilizado em diferentes escalas de projetos, dependente apenas do estudo de disponibilidade no local.

O vento apresenta características de variabilidade e imprevisibilidade e assim permite a utilização combinada com outras fontes (Lima, 2010). A ameaça de escassez de outras

fontes de energia, também possibilita que sistemas eólicos ganhem destaque no quadro da matriz energética, ainda mais em razão do grande potencial disponível no território nacional.

O sistema de geração de eletricidade através dos ventos sofre com a inconstância do recurso ao longo das estações do ano, em decorrência das características temporais em função das grandezas que o modelam, como alterações climáticas, variações sazonais e as variações em intervalos de tempo, que podem ser de minutos a meses. Em função disso, o ritmo de geração dos sistemas eólicos dependerá da necessidade requerida pela rede. Esses indicativos de variações estão diretamente relacionados as influências da topográfica do local em função da rugosidade e dos tipos de ventos presentes na região, que podem mudar a garantia de geração do projeto e, a capacidade de aproveitamento do movimento das massas de ar pelas máquinas aerogeradoras.

Os estudos do vento nos estados do Nordeste (NE) mostram que as velocidades médias do vento são altas, com poucas variações nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano, se comparado a outros estados (Miashyro, 2013). Desta forma a utilização do vento como fonte de energia tem crescido significativamente em estados como o Ceará, um dos primeiros a realizar estudos sobre o vento em seu território. Entretanto, outras regiões do Brasil também são favorecidas pelo potencial eólico disponível, como o Rio Grande do Sul, que tem instalado um dos maiores parques nacionais, o Parque Eólico de Osório, com capacidade de 150 MW.

Para a geração de energia elétrica através do vento, identifica-se que a Região Nordeste apresenta disponibilidade significativa e assim há a necessidade de mapeamentos e levantamento dos parâmetros de rendimento energético para a determinação dos locais que forneçam o melhor aproveitamento. Há para conhecimento, atlas que indicam a velocidade média do vento, porém é necessário que exista também valores relacionados à geração de energia que possibilitem o estudo da viabilidade do empreendimento.

A definição da relação entre vento e energia elétrica depende da região disponível para geração e da atuação dos mecanismos de vento em macro, meso e microescala (Silva, 2003). A identificação da ocorrência de vento é uma análise que depende da sensibilidade do fenômeno ao clima regional e as características da região. Para analisar essa relação, fazem-se estudos que verificam as condições de vento associadas às características físicas da área e assim, verifica-se qual ponto seria o mais propenso a geração de energia elétrica.



### 2.6.1 Turbinas eólicas

Todo o processo de aproveitamento da cinética dos ventos para a conversão final em energia elétrica ocorre nas turbinas eólicas. São os equipamentos com a finalidade de converter o vento e fornecer ao sistema uma energia resultante, a elétrica. O funcionamento desses equipamentos para a geração de eletricidade envolve técnicas aerodinâmicas, elétricas, análises civis, diferentes setores de engenharia, avaliação meteorológica e das características da localidade para verificar se a movimentação resultante da rotação das pás, devido à incidência do vento gerará um volume significativo de eletricidade.

As turbinas eólicas utilizam os ventos que fluem próximos à camada do solo e, na região denominada de camada limite, que é a camada limite atmosférica, região com altura típica de 1 km e situada abaixo da troposfera (Santos, 2006). Essa região sofre interferência das condições da superfície terrestre e muda o comportamento na geração de energia devido ao vento vindo dos fluxos geostróficos para as camadas mais baixas. Desta forma, a geração de energia pelos aerogeradores, tem uma relação com a rugosidade do solo e do fluxo de vento. Segundo Custódio (2009), a conversão da energia cinética em energia elétrica nas turbinas é alcançada pela redução na velocidade do vento.

Para a geração de energia em um sistema, existe a aplicação de engenharia voltada as várias etapas de conversão energética para o aproveitamento eólico. São quatro tipos principais de transformações energéticas até que o resultado seja eletricidade, elas começam desde a mudança da energia cinética das massas de ar, que primeiramente se apresentam como de translação em energia cinética de rotação das pás. Posteriormente esse movimento é caracterizado como energia mecânica, devido ao movimento que aciona todo o dispositivo de engrenagens até o gerador, que é o responsável pela conversão final em energia elétrica.

Todas as turbinas eólicas utilizam de mecanismos para controle da potência elétrica de saída continuamente. Segundo Silva (2003), quando existem altas velocidades de vento esse mecanismo diminui a eficiência da máquina, no processo que diz respeito a conversão de energia cinética disponível no vento em energia elétrica. Ou seja, todos os modelos de turbinas eólicas têm a velocidade nominal de operação e, quando atingido fornece a potência nominal da máquina, que será interrompida totalmente quando alcançada a velocidade de *CUT-OUT*, que é a velocidade máxima de giro do rotor. Na figura 5, observam-se os principais componentes que constituem uma turbina.

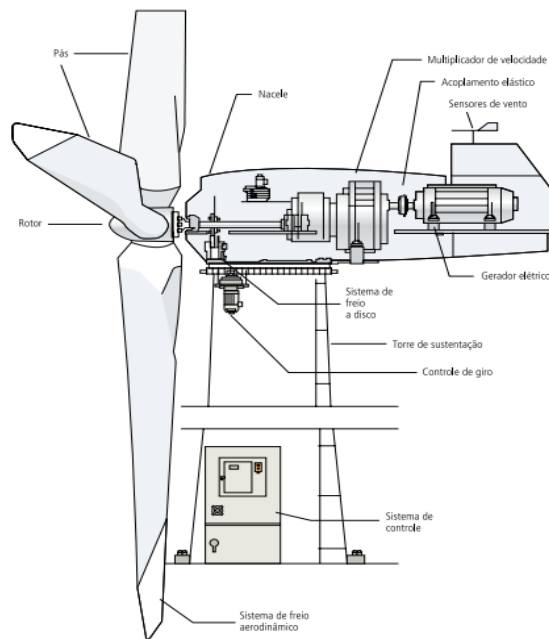


Figura 5: Partes constituintes de uma turbina eólica. (CBEE / UFPE. 2000).

### 2.6.1.1 Turbinas de eixo horizontal

As turbinas de rotor de eixo horizontal são as mais comuns e baseiam-se no funcionamento dos antigos moinhos de vento. Normalmente são constituídas por três pás, mas podem apresentar um sistema multipás. A variação das características depende da relação entre o coeficiente de potência e a velocidade específica de rotação. O rotor de eixo horizontal de três pás apresenta maior estabilidade e se comporta melhor aos períodos de turbulências, o que possibilita que os equipamentos sejam instalados a maiores alturas e ainda que sejam construídos com potências nominais superiores.

Como o vento sopra pela parte frontal do equipamento, as pás do rotor orientam a direção do vento através do motor e, assim existem diferentes vetores e forças atuando sobre a superfície rígida do perfil da pá. As pás do sistema horizontal apresentam uma área de varredura em forma de disco, ou seja, circular e que fornecem ao vento que sopra sobre elas uma direção perpendicular à direção do vento, fazendo com que a força atuante (equação 1) sobre esse modelo seja a de sustentação, figura 6.

$$F_{sustentação} = c_s \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde:

- $c_s$  é o coeficiente desustentação;
- $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $1,225 \text{ kg/m}^3$  ao nível do mar);
- $A$  é a área de giro das pás;
- $v$  é a velocidade do vento que incide sobre as pás;
- $F_{sustentação}$  é a parcela da força de sustentação.

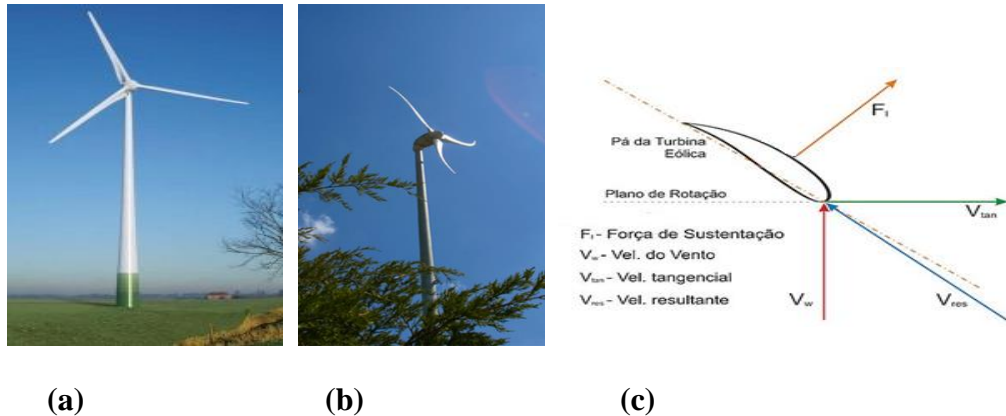


Figura 6: (a,b) Aerogerador de eixo horizontal. Fonte: Enercon e Skystream e (c) Força de sustentação. (Fonte: Cresesb).

### 2.6.1.2 Turbina de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical apresentam sentido de rotação diferente das turbinas de eixo horizontal, isso devido ao modelo do rotor, das pás e o posicionamento dos equipamentos em relação ao fluxo de ar, figura 7.

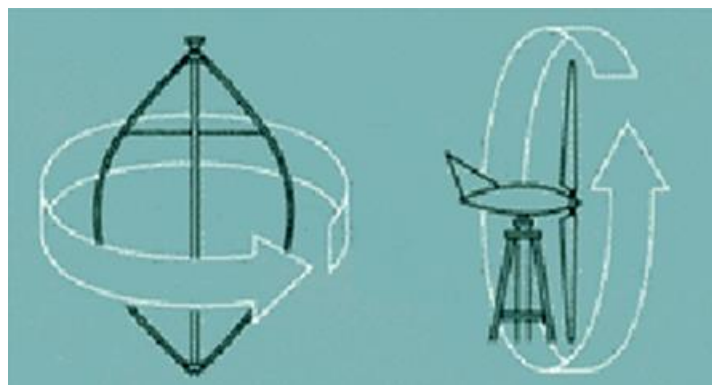


Figura 7: Sentido de rotação de acordo com a configuração do eixo do aerogerador. (Cresesb)

Elas apresentam diferentes configurações devido aos diferentes rotores. E essas configurações fazem com que as turbinas tenham aplicações em escalas diferenciadas de perfil

de vento. A força predominantemente atuante nesse modelo de aerogerador é a composição de arrasto da força exercida pelo ar para o deslocamento da pá, de acordo com a figura 8. Essa força ocorre devido à resistência do material ao fluxo de ar, que gera um sentido da rotação no eixo em função do vetor velocidade. O efeito de arraste depende das características do objeto e das propriedades do ar, e essa combinação resulta em um movimento de deslocamento no sentido da força resultante atuante do vento. A equação (2), descreve a força de arrasto é caracterizada pelo coeficiente de arrasto que é índice que mede a força exercida sobre o objeto, assim:

$$F_{arrasto} = c_a \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Onde:

- $c_a$  é o coeficiente de arrasto;
- $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $1,225 \text{ kg/m}^3$  ao nível do mar);
- $A$  é a área de giro das pás;
- $v$  é a velocidade do vento que incide sobre as pás;
- $F_{arrasto}$  é a parcela da força de arrasto do vetor força gerado perpendicularmente

a pá.

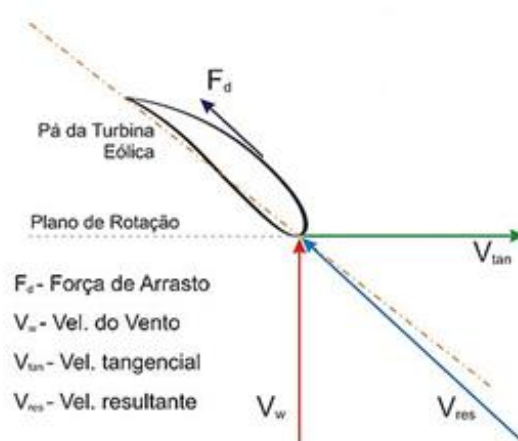


Figura 8: Força de arrasto resultante da Força do vento que incide sobre a pá da turbina. (Cresesb)

Quando comparados aos modelos de eixo horizontal, o aerogerador de eixo vertical apresenta uma velocidade de partida inferior e ainda possibilitam o aproveitamento dos ventos com velocidades menores. Essa comparação é possível devido a determinação do coeficiente de potência e da velocidade de ponta nas turbinas, que indicam qual a máquina que apresenta o

melhor desempenho dentro de determinadas faixas de vento, como pode ser visto na figura 9. Para as turbinas de eixo vertical destacam-se principalmente as de rotores verticais: Darrieus e Savonius.

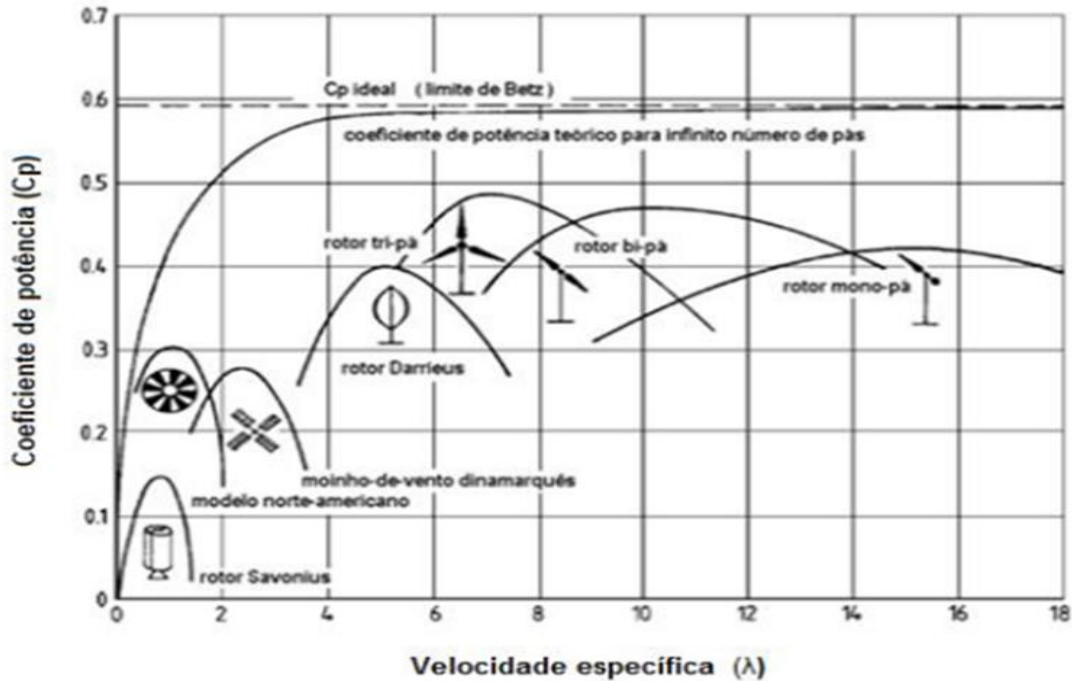


Figura 9: Relação velocidade específica e coeficiente de potência.

## 2.7 Sistemas de geração de energia eólica

### 2.7.1 Sistemas de pequeno porte

Os sistemas de pequeno porte são compostos por micro e mini aerogeradores que tem a finalidade de gerar eletricidade a partir da força dos ventos, com potências suficientes para abastecerem pequenos pontos consumidores, que podem ser casas e comércios, ou pequenas indústrias. Esses sistemas são regulados pela Resolução Normativa 482/8012 da ANEEL, que define a forma como a distribuição e instalação dos equipamentos compreendidos entre 100 kW até 1MW podem ser aproveitados. Esses tipos de sistemas podem ser conectados ou não a rede do sistema interligado nacional (SIN). Segundo Polizel (2007), a reforma institucional realizada no setor elétrico brasileiro proporcionou a reestruturação e o surgimento de vários incentivos, através da redução de encargos e da facilitação na capacidade de acesso à rede do sistema, possibilitando que os números de conexões de geração distribuída aumentassem no país. Pode-se dividir de duas formas os sistemas de pequeno porte como sendo:

## Sistemas Isolados

Os sistemas com essa configuração são utilizados em pequenas instalações e, necessitam de equipamentos para o armazenamento da energia excedente, como forma de garantir energia elétrica nos momentos que não há disponibilidade de vento suficiente para a geração de eletricidade. Esse processo de armazenamento é feito comumente utilizando bancos de baterias, o que agrega ao sistema um custo maior, isso porque é necessária à instalação de outros equipamentos como o controlador de carga, que tem a finalidade de garantir que não ocorram danos de sobrecargas ou descargas profundas no banco de baterias e ao circuito. Em sistemas eólicos isolados ou independentes, o gerador eólico é a única forma de energia elétrica para abastecer a localidade, não há pontos de conexão entre a rede do sistema interligado para fornecimento de eletricidade, como pode ser visto na figura 10.

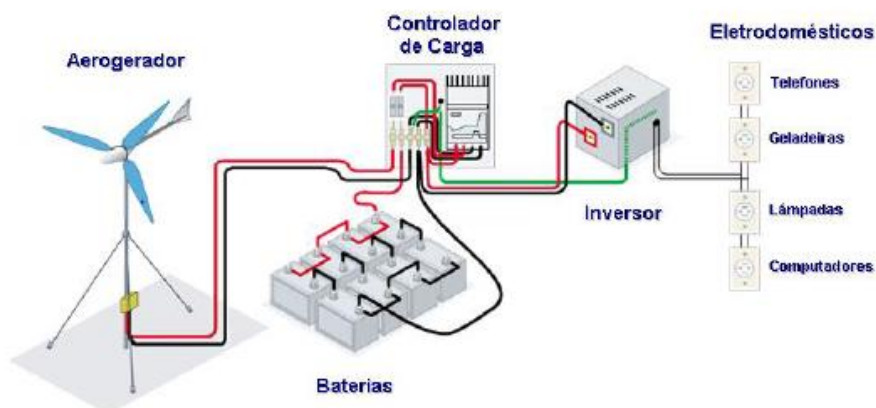


Figura 10: Sistema eólico isolado da rede. (Dutra, 2009)

## Sistemas conectados à rede

A finalidade desses sistemas é a mesma de um sistema isolado, gerar energia de forma que a energia elétrica resultante da conversão da energia eólica supra a demanda energética da unidade. O diferencial entre os sistemas, é a forma como está conectado com a rede, e assim é constituído por duas fontes de energia, a proveniente do sistema eólico e a da energia fornecida pela rede pública. Na figura 11 pode-se verificar o circuito básico para conexão dos aerogeradores à rede.



Figura 11: Sistema conectado à rede do SIN. (Carbon Trust)

## 2.7.2 Sistemas de grande porte

Os sistemas de grande porte são denominados, fazendas ou parques eólicos e, são sistemas de geração de energia conectados à rede elétrica e constituídos por um grande número de turbinas eólicas, que produzem um montante de energia elétrica entregue diretamente ao sistema de distribuição do SIN.

## 2.8 Parques eólicos

Parque eólico é a denominação dada para a região ocupada por aerogeradores com a finalidade de gerar energia elétrica. Esses parques são responsáveis por gerar um montante de energia significativo e, são conectados ao sistema nacional de energia. O aproveitamento da energia eólica, para fins energéticos em um parque eólico está ligado à implementação do projeto, que pode enfrentar desafios devido ao cenário climático e ocorrências de ventos, combinados a geografia da terra e o zoneamento da região (Wang et al., 2015).

No Brasil existem cerca de 300 parques instalados, de acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Eólica, principalmente nas regiões nordeste e sul, isso em razão da potencialidade eólica dessas localidades. Alguns dos principais parques do Brasil são:

- Usina de Energia Eólica de Praia Formosa: instalada na região nordeste, na cidade de Camocim no estado do Ceará, a capacidade instalada é de 104 megawatts.
- Parque Eólico do Rio de Fogo: Localizado na cidade de Rio do Fogo no Rio Grande do Norte com capacidade instalada de 41 megawatts.
- Parque Eólico Eco Energy: Localizado na cidade de Beberibe no estado do Ceará. Possui capacidade instalada de 25 megawatts.

Como a energia eólica é atualmente a fonte em evidência, cresce a construção de parques eólicos por todo mundo contribuindo, portanto, com o amadurecimento da tecnologia

durante o passar dos anos, e mostrando que a o aproveitamento eólico está baseado em avanços significativos da engenharia, e um ritmo crescente da capacidade acumulada mundial (Dutra, 2001). Em alguns lugares no mundo, a geração de eletricidade através dos ventos é tão representativa que existem matrizes energéticas composta grande parte pela energia vinda dos ventos, como nos Estados Unidos, segundo maior produtor de eletricidade através dos ventos, e onde justamente está localizado o maior parque eólico do mundo, o Horse Hollow Wind Energy Center, e Portugal que atualmente explora quase todo território disponível para instalação de sistemas *on-shore*.

### **2.8.1 Características dos parques eólicos**

A melhor forma de aproveitar a energia eólica é através da instalação de complexos de geração, que são formados por vários aerogeradores, que ocupam uma extensa área, explorando ventos médios, e que favoreçam o processo de produção de eletricidade (Lopez, 2012). O processo de instalação de um parque eólico envolve variáveis como condições do terreno e velocidade do vento, que modelam o volume de energia disponível no local.

As fazendas ou parques eólicos são considerados sistemas bons quando há integração entre as condições de geração e características das máquinas com o ambiente e a comunidade (Herp et. al., 2015). Não é interessante que um parque seja instalado em uma região sem que ocorra avaliação prévia da disponibilidade de geração e, a interação com o meio onde pretende-se inserir o sistema, assim utiliza-se de ferramentas matemáticas para auxiliar em um processo de análise inicial que possa oferecer como resposta o resultado de uma filtragem prévia. Pode-se auxiliar nos projetos com o objetivo principal de gerar a máxima energia, aproveitando os fatores condicionados ao terreno e infraestrutura, para que em longo prazo o impacto do tempo de geração e toda vida útil da usina, que é de aproximadamente 20 anos, compense todo investimento realizado (Lopez, 2012).

As preocupações que envolvem a construção desses sistemas levam em consideração o efeito sobre o meio ambiente e a sociedade, principalmente a viabilidade técnica e econômica dos empreendimentos, que segundo Lopez, (2012), necessitam de uma etapa de predição e infraestrutura civil e técnica confiável, que podem demandar processos rigorosos de instalação e construção do parque eólico, com a finalidade de se obter alta confiabilidade, evitando falhas que podem comprometer a operação do circuito elétrico e, que tornem o fornecimento de energia inviável aos consumidores, ou gerem um cenário de incertezas



associados ao comportamento aleatório do vento e a capacidade de injeção dessa energia no SIN (Albuquerque et. al., 2011). Assim, especialistas e engenheiros trabalham com ferramentas de estimativa de geração de energia, o que permite a análise do custo do projeto e o tempo de retorno do investimento.

O cálculo da produção de energia elétrica auxilia nos parâmetros analisados para as avaliações do rendimento e de eficiência de geração de um sistema, assim como a localização e as características do vento indicam se o local é viável para geração de energia através dos ventos. Quando se avalia a disponibilidade do regime do vento em uma região e sua capacidade de geração de energia, leva-se em consideração à variabilidade do processo que envolve o recurso natural. Portanto, para se realizar um investimento é importante determinar qual o modelo e a finalidade do processo, para tomar qualquer decisão acerca dos sistemas de geração (Dutra, 2001). Nos procedimentos de prospecção, pode-se considerar que existe uma equação para geração de energia, que indiretamente depende da rugosidade do terreno e sua influência sobre a estabilidade térmica vertical da atmosfera (Lopez, 2012).

Além da avaliação do rendimento do parque, é necessária a análise ambiental e social do sistema que se pretende implantar. Mesmo que a geração eólica seja considerada um processo limpo e, que forneça uma geração livre da emissão de gases causadores do efeito estufa é necessário que aconteçam iniciativas de preservação ambiental. Sabe-se que a associação de aerogeradores em parques eólicos, emite em toneladas de gases menos que pequenas centrais hidrelétricas, de acordo com os dados do World Energy Council, que é o Fórum internacional de ideias para promover o fortalecimento de um crescimento sustentável de energia em benefício ao ambiente e as pessoas.

De acordo com Silva (2003), uma turbina eólica de 750 kW é capaz de produzir em média anualmente cerca de 2MWh de energia elétrica, e considerando que em média 0,60 kg<sup>2</sup> de CO<sub>2</sub> equivalente são emitidos por cada kWh de energia produzido, a utilização dessa turbina impediria a emissão de aproximadamente 1.200 toneladas de CO<sub>2</sub> em um ano na atmosfera. Assim, mostra-se que a geração eólica contribui para a redução de impactos no meio ambiente devido à produção de energia. Ainda de acordo com Silva (2003), existe a previsão realizada pela EWEA que a elevação da participação de energia eólica na matriz mundial para 12% até o ano de 2020, poderá reduzir para a emissão de um montante de aproximadamente 10,921 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Além disso, existe a preocupação de que os parques eólicos não interfiram na fauna e na estrutura ambiental onde será inserido, desta forma, as torres das turbinas são construídas

onde não há alta concentração urbana, para que não ocorra interferências diretas na vida da população e, em locais onde não será necessário corte de árvores ou deslocamento de espécies e, que ainda não interfira no comportamento dos pássaros, o que poderia causar a mortalidade dos animais devido à colisão com as pás dos aerogeradores (Terciole, 2002).

### **2.8.2 Parques eólicos e o meio ambiente**

A construção de parques eólicos para a geração de energia passa por um processo de análise ambiental, para que os efeitos dos equipamentos sobre o meio ambiente sejam os menores possíveis. Dentro das análises feitas, encontram-se os processos de prospecção voltados ao meio ambiente, para que os principais obstáculos sejam identificados no projeto. Os impactos do parque sobre o ambiente são considerados quase desprezíveis, isso porque, os processos de geração de energia através da energia eólica não emitem gases poluentes para a atmosfera fazendo com que essa energia seja considerada limpa. Outros impactos considerados nulos para esses projetos são os de desmatamento, já que não há a necessidade de áreas alagadas e grandes construções que demandem corte de árvores. Nos projetos as principais questões levantadas são:

- Ruídos: Os aerogeradores de grande porte durante o giro das pás emitem um ruído de intensidades razoáveis e que podem gerar algum nível de incomodo para as regiões vizinhas. Esses sons são audíveis e acontecem principalmente devido ao fluxo de ar nas pás e aos equipamentos de geração.
- Impactos visuais: Os equipamentos dos parques são máquinas de grande porte e podem gerar efeitos visuais, como sombreamentos causados pela passagem das pás das turbinas por feixe de luz, e que causam reflexos nas áreas residenciais ao redor e podem gerar fadiga e estresse para a população.
- Uso e ocupação da área: Grandes áreas são necessárias para a implantação dos parques eólicos, uma vez que recomenda-se que o espaçamento entre as turbinas seja entre três e cinco diâmetros do rotor na direção perpendicular ao vento e na mesma direção do vento entre cinco e nove diâmetros (Coutinho, 2012) e assim é necessária a avaliação da ocupação da terra para que não interfira na comunidade da região.

- Interferência na rota migratória das aves: Um dos principais efeitos negativos sobre o ambiente relacionado aos parques eólicos e a mortalidade de aves que acontece devido ao impacto dos animais nas pás das turbinas.

### **2.8.3 Parques eólicos e a interação com a sociedade**

Segundo Maristella, (1999), as questões socioambientais ainda são indefinidas, mas podem ser consideradas como as formas idealizadas de atitudes que gerem políticas públicas para que se inclua a sociedade presente em comunidades locais ao ambiente. Além disso, para um país em desenvolvimento, como o Brasil, é importante promover não só a sustentabilidade ambiental ou do ecossistema, mas também a sustentabilidade social, gerando assim uma redução na diferenciação das classes sociais e permitindo que mais níveis sociais estejam incluídos em várias decisões comuns a sociedade (Freitas, 2012), como a geração de eletricidade e o processo de implantação de um sistema como os dos parques eólicos.

De acordo com Silva (2006), para o planejamento elétrico é importante avaliar a ampliação da demanda e conseqüentemente da oferta, sendo que o consumo médio per capita nacional modifica-se ao longo dos anos, com estimativa de que o crescimento de energia seja de ao menos 5%, mesmo em períodos onde não há desenvolvimento econômico. Além disso, a utilização da energia eólica por ser uma das fontes mais baratas de energia atrai novos investimentos de alta rentabilidade, se comparada a uma termelétrica, durante o processo de geração o que retorna uma energia com valor médio de kWh menor, e assim podendo ser uma alternativa para as unidades consumidoras e para as empresas dos setores de geração, transmissão e distribuição. Se a utilização de hidrelétrica favoreceu o Brasil em diversos setores, sabe-se que a energia eólica apresenta um futuro promissor, baseado em sistemas com ganhos de eficiência, aumento de produtividade e relação harmônica entre a engenharia de geração e exploração do local com a sociedade presente.

### **2.8.4 Considerações técnicas dos parques eólicos**

Para a construção de um parque levam-se em consideração variáveis técnicas que descrevem qual a possibilidade de geração de energia nessa área. Com isso, buscam-se as melhores formas de aumentar o rendimento e melhorar o funcionamento das máquinas para cada tipo de relevo e comportamento do vento. Para verificar a disponibilidade de geração de

energia, é necessário conhecer alguns parâmetros, como o regime dos ventos no local a partir do histograma de velocidade estimado ou medido e a curva de potência, vinda dos ensaios realizados nas turbinas eólicas (Dutra, 2001).

O valor da energia gerada anualmente por um empreendimento é o principal parâmetro para o desenvolvimento dos projetos eólicos e, verificação da viabilidade econômica (Silva, 2003). O estudo de previsão de geração de um parque envolve incertezas, que podem assumir diferentes proporções dependendo dos dados de vento e dos modelos numéricos utilizados nas análises de prospecção. A identificação das áreas mais favoráveis para a construção de parques eólicos é importante por fornecer ferramentas teóricas para a *micrositing* do sistema e a viabilidade técnica do projeto.

Os aerogeradores são descritos pela ficha técnica que fornecem a curva de potência do equipamento, que é a característica de geração em função do vento e da potência da máquina. Para cada velocidade de vento existe uma potência disponibilizada pelo aerogerador, o que significa que para cada instante de geração a turbina será capaz de converter a energia eólica em elétrica em função da disponibilidade de vento. Cada turbina poderá converter no máximo até o valor de potência nominal, o que acontece para um valor de vento específico, que após ser alcançado faz com que o sistema de freio e proteção seja acionado, e a turbina não aproveitará mais o vento após a velocidade máxima de operação do sistema.

Como forma de ilustrar a curva de potência e a relação de potência por vento tem-se a figura 12, de um aerogerador de 3MW, disponibilizada pelo fabricante.

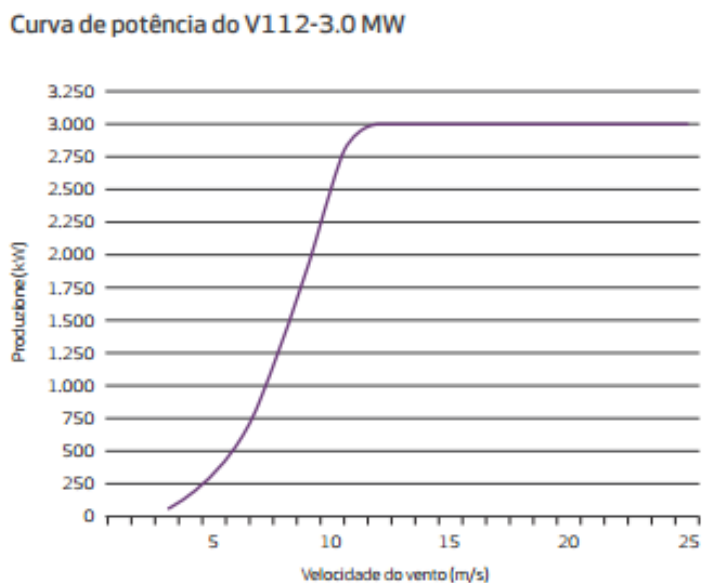


Figura 12: Curva de potência de um aerogerador de 3MW. (Catálogo Vestas)

### 2.8.5 Potência eólica

Segundo Martins et al., (2008), o vento muda de velocidade de acordo com a camada específica e o vetor resultante do gradiente de pressão naquele ponto, assim em superfícies onde há significativa rugosidade, existirá conseqüentemente uma redução da velocidade do vento que escoar por ela. Com isso o vento tende a escoar em altos níveis, de forma que causará a tendência de vento mais linear a alturas superiores.

A constatação da velocidade do vento em cada localidade é importante para verificação da energia disponível para ser gerada pelas turbinas eólicas, que irão essencialmente converter a energia cinética contida no vento em mecânica no rotor e posteriormente em energia elétrica no gerador. A característica intermitente do vento faz com que o volume de energia eólica do processo de conversão, não seja o suficiente para atender a demanda em algumas horas do dia, como o horário de pico ou podem ocasionar níveis de tensão nos pontos de conexão do sistema elétrico que impactam diretamente na potência elétrica injetada no SIN, tanto em volume de energia quanto em qualidade energética. A potência eólica  $P$  encontrada no fluido perpendicular à velocidade de giro no rotor indica se a característica variável do vento poderá causar perdas de aproveitamento do sistema. Essa potência pode ser calculada através da equação (3) (Martins et al., 2008):

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

Onde:

- $P$  é a potência eólica;
- $\rho$  é a massa específica do ar;
- $A$  é a área de giro da turbina;
- $v$  é a velocidade do vento.

De acordo com Silva (2003) o impacto das dispersões nas ocorrências de velocidade do vento sobre a densidade de energia é um parâmetro importante para análise do potencial eólico local. Desta forma a potência eólica da equação (3), descreve diretamente a velocidade cúbica média do vento e o potencial que poderá ser disponibilizado por ele para o processo de conversão de energia.

- **Massa específica do ar**

A densidade do ar ou massa específica do ar ( $\rho$ ) é a massa de ar por unidade de volume na atmosfera terrestre. Ela descreve de forma dinâmica qual o nível de aquecimento ou resfriamento do ar. A característica principal da massa específica do ar é que quanto maior a altitude menor é o índice de  $\rho$ , e ainda se altera de acordo com a temperatura e umidade do ar. O valor da densidade do ar interfere na intensidade com que as massas de ar fluem pela atmosfera e no aproveitamento eólico nas turbinas.

A avaliação da densidade do ar é uma variável importante para as medições de vento e podem variar em diferentes níveis e graus. Ela é descrita pela pressão atmosférica e pela constante dos gases perfeitos, de acordo com a equação (4):

$$\rho = \frac{P}{R.T} \quad \therefore \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad (4)$$

Onde:

- P é pressão atmosférica;
- R é a constante dos gases perfeitos;
- T é temperatura.

## 2.9 Perfil de velocidade do vento

Na superfície da camada terrestre o vento sofre interferências do relevo e da rugosidade e, em razão disso existem problemas que podem surgir nos projetos, desta forma é importante analisar o terreno quanto às condições climáticas e a rugosidade da área. Dependendo das condições da rugosidade do terreno, a camada limite entre o vento laminar e o vento de perfil turbulento interferem na capacidade de geração de energia pelos aerogeradores.

Segundo Gualtieri et al. (2012) a característica de cisalhamento do vento é um dos principais parâmetros analisados para a avaliação de energia eólica, e como as alturas de medição das torres meteorológicas são significativamente menores do que as das turbinas atuais, é necessário extrapolar o vento, para observar o seu comportamento desde alturas inferiores ou em alturas maiores, por exemplo, na altura do cubo da turbina. A prospecção do potencial de energia eólica em um determinado lugar requer a análise do vento em diferentes alturas e, assim é considerável que se saiba a evolução da velocidade do vento em altitude, para

se representar diretamente a energia disponibiliza para a rotação das pás no eixo do rotor. Essa análise de altitude e, a interferência na energia disponível foi obtida através da teoria da similaridade que complementa os estudos de extrapolação do vento principalmente para a utilização energética, e que utilizam as extrapolações em sentido vertical de acordo com as classes de rugosidade (Elamouri et al., 2010).

Segundo Lopez (2012), o vento ao encontrar um obstáculo deixa de ser laminar e forma portanto, ondas que não permitem que o fluido escoe de forma paralela ao solo, mas sim em diferentes direções entorno do eixo do aerogerador. A diferença de temperatura que implica na diferença de umidade e densidade do ar, resulta em turbulências e na redução da velocidade do vento. Essas implicações tornam o processo de utilização do vento para a geração de energia um processo com perdas e de menor aproveitamento do potencial eólico, e em razão disso é necessário verificar se existem obstáculos que impactem diretamente no aproveitamento do giro das turbinas para a conversão de energia, ou seja, se existe impedimento em altitude para que o vento chegue de forma laminar as pás.

Combinando o perfil vertical do vento e seu comportamento estocástico ao longo de intervalos, a variação da velocidade do vento é uma função do tempo e das características topográficas da região, variando de acordo com as alterações do tempo e da rugosidade (Lopez, 2012). Assim os principais causadores das interferências na velocidade do vento são:

- Rugosidade do terreno, caracterizada principalmente pela vegetação e uso e ocupação do solo;
- Variação da velocidade de acordo com a altura;
- Obstáculos na região do empreendimento, como prédios altos ou montanhas que possam causar o efeito colina;
- Densidade do ar.

Na aplicação do vento para a geração de energia elétrica é importante verificar além da velocidade a direção, o seu comportamento temporal, isso porque segundo Lopez (2012) o vento apresenta transformações diárias e horárias ao longo de semanas, assim é necessário trabalhá-lo em um modelo probabilístico. O método mais utilizado para a estimativa do comportamento do vento em diferentes alturas é em função da rugosidade, e chamado de lei logarítmica (Manwell et al., 2002), que auxilia na prospecção e determinação do modelo probabilístico para descrever o potencial eólico.

O perfil da velocidade do vento é afetado pelo tipo de vegetação, ou qualquer outra irregularidade na cobertura do solo, que tendem a aumentar a fricção com o ar e assim,

funcionar como um obstáculo para o seu escoamento. Desta forma, é bastante usual que se leve em consideração que ao longo do tempo, exista uma flutuação da velocidade do vento e que influencia de forma direta na produção de energia. Segundo Salvador (2012), o comportamento de geração de uma turbina eólica é uniforme e desloca o aproveitamento de energia de acordo com a curva de potência, para baixo juntamente com a potência nominal e quando comparado a geração com uma curva de potência uniforme sem turbulências, apresenta um escoamento com velocidade mínima, e desta forma indica que a turbulência e o perfil vertical do vento são os fatores que estão relacionados à estabilidade e com a produção de energia por um aerogerador.

A extrapolação horizontal do vento também se aplica para estudos eólicos, porém para fins de geração de energia de acordo com Melo (2012) a aplicação da análise do comportamento vertical pode auxiliar na estimativa de energia e assim na viabilidade econômico-financeira para exploração do recurso eólico e, indica que é extremamente importante a correlação entre a altura das torres e a extrapolação vertical da velocidade do vento para estudos de estimativa de potencial eólico.

## **2.10 Materiais**

### **2.10.1 Dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**

O Cresesb é o Centro de Referência para Energia Solar e Energia Eólica Sergio Brito, desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica) e tem como principal objetivo favorecer o desenvolvimento das fontes de energia solar e eólica, estimulando o crescimento de estudos e de projetos na área. As informações presentes no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro são resultados de um modelo de previsão numérica.

Os valores e parâmetros de vento são modelados de acordo com a geografia, relevo, rugosidade e interações térmicas entre a superfície do solo e a interação com a atmosfera. Para cada região do Brasil, as informações são disponibilizadas de acordo com as referências existentes, e os dados meteorológicos determinados por simulações e análises dos ventos e temperatura, resultantes de medições e do modelo de referência representativo, que é disponibilizado em grades com dimensões em km<sup>2</sup>, e que fornece uma área com resolução que permite verificar os melhores pontos para geração de energia. Os dados estão disponíveis em [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br).



### **2.10.2 Dados das estações meteorológicas**

As estações são compostas por equipamentos eletrônicos e sensores que registram as variáveis meteorológicas e que são utilizadas em previsões futuras e análise das estimativas de geração de energia elétrica proveniente dos ventos nas regiões onde estão posicionadas.

As informações meteorológicas utilizadas no estudo são das Plataformas de Coleta de Dados (PCD's), que fornecem informações clássicas como de temperatura, pressão e de direção e velocidade do vento. Elas são muitas vezes utilizadas por empresas que necessitam do monitoramento de alguns recursos ambientais, como por exemplo, dos índices pluviométricos nas regiões onde existem usinas hidrelétricas instaladas para a verificação preventiva dos níveis de água dentro dos reservatórios e, elaboração de planos caso ocorram períodos de cheias ou seca, sem que haja comprometimento na produção de eletricidade. As informações utilizadas são do Sistema Integrado de Dados Ambientais, disponibilizado pelo INPE, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, vinculado ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação.

### **2.10.3 Dados dos parques disponibilizados pela ANEEL e em bancos de registros de parques eólicos**

Periodicamente a ANEEL divulga os dados correspondentes aos parques eólicos em operação no Brasil. Isso através de informações contidas em relatórios técnicos mensais que podem ser obtidos no site da ANEEL (<http://www.aneel.gov.br/>), ou em sites de registro dos parques eólicos em funcionamento por estado no país, como em [www.ceara.gob.br](http://www.ceara.gob.br). Os dados disponibilizados são referentes a previsão de fator de capacidade que as fazendas eólicas em operação atingem ao longo de cada mês do ano, como o fator de capacidade e a energia disponibilizada pelo parque para o SIN. Desta forma, os dados cadastrados nesses relatórios técnicos podem ser utilizados como referência e para comparação e verificação se a metodologia de prospecção se aplicada a uma região onde há parques em operação, e retorna valores próximos aos valores reais.

## 3. Metodologia

### 3.1 Extrapolação vertical

Os dados sobre a velocidade do vento são diferenciados em cada região e para que sejam utilizados, é necessário que as informações fornecidas, pelo histórico de medições das estações meteorológicas que estão disponibilizados para uma altura de 10 metros e os dados obtidos pelo CRESESB (Atlas eólico) que são referentes à altura de 50 metros, sejam analisadas e tratadas, de forma que fiquem correspondentes as alturas dos aerogeradores e sejam utilizadas como entradas niveladas para o estudo. Existem diferentes equações para a extrapolação vertical do vento para níveis diferenciados de altura, e para estudos relacionados à energia eólica utiliza-se principalmente a lei logarítmica ou lei de Helman.

#### 3.1.1 Lei exponencial de Helman ou Lei da Potência

De acordo com Linard (2010) a descrição do escoamento do vento é obtida utilizando o perfil de velocidade média instantânea no local que se pretende prospectar o potencial eólico. Para isso, utiliza-se leis experimentais que permitem ajustar as velocidades médias do vento, de acordo com as características de rugosidade da superfície, e em função da variação de velocidade média, com a altura estimada para a geração de energia. Estão compreendidas dentro dessas leis experimentais, a Lei Logarítmica e a Lei da Potência conhecida também como lei de Helman.

Para a extrapolação do vento o método mais utilizado é o que descreve matematicamente o perfil do vento de acordo com a altura e com a rugosidade do terreno, que segundo Camelo (2010), fornece uma lei que é a combinação teórica empírica originada do fluxo da camada limite em dinâmica dos fluidos. Elas descrevem a extrapolação vertical de acordo com a altitude, altura do eixo, velocidade do vento e característica do terreno (Población, 2012). A lei logarítmica é aplicada para velocidades do vento vertical que apresentam variações e necessitam de ser modeladas em uma condição particular de terreno, e é descrita pela equação (5).

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\ln \frac{h_1}{z_0}}{\ln \frac{h_2}{z_0}}$$

(5)

Onde:

- $v_2$  é a velocidade do vento que pretende-se determinar de acordo com a altura desejada.
- $v_1$  é a velocidade do vento na altura de referência.
- $h_2$  é a altura para qual pretende-se extrapolar o vento.
- $h_1$  é a altura de referência.
- $z_0$  é o comprimento de rugosidade.

O resultado da aplicação desse método resulta em um perfil da característica eólica em uma região. Quando aplica-se essa equação, considera-se que as condições de estabilidade atmosféricas sejam neutras, isto é, não existe diferença na temperatura da superfície do solo em relação ao ar (Machado, 2008).

Existem adaptações da Lei Logarítmica que consideram o comprimento da rugosidade de formas diferenciadas, entre essas adaptações existe a Lei da Potência, que de acordo com Salvador (2012) é amplamente utilizado no âmbito da engenharia eólica, e é aplicada para definir o perfil vertical de velocidade do vento ao longo da camada limite atmosférica. Nessa lei o expoente  $\alpha$ , é o expoente de gradiente do vento, e é o responsável por relacionar os valores de referência com os parâmetros de extrapolação. Essa adaptação da Lei Logarítmica foi definida no ano de 1960 com o perfil de atender principalmente a engenharia relacionada ao vento fornecendo uma forma simplificada para o cálculo de extrapolação vertical do vento.

A curva característica da Lei de Potência adapta-se melhor aos diferentes tipos de estabilidade atmosférica e, aos solos com diferentes rugosidades (Salvador, 2012). Em superfícies que apresentam relevos mais acentuados existe uma aceleração do vento próximo ao solo o que diminui o fator de rugosidade. Para que seja estabelecido um parâmetro de qualidade e segurança nos empreendimentos, com a finalidade de gerar energia eólica, existem normas que regulamentam o posicionamento dos aerogeradores e os locais onde é seguro a construção de parques eólicos, para que não haja acidentes ou perda do aproveitamento eólico.

A altura do posicionamento do aerogerador influencia no perfil de velocidade do vento e, pode comprometer a qualidade da produção de energia (Wagner et al., 2010) como pode ser observado na figura 13, sendo assim, as alturas utilizadas para estudos e prospecções da potencialidade de uma região para gerar energia eólica através do vento, são principalmente as que fornecem ao rotor a melhor forma de varrimento e área de potência eólica. Sabe-se da

literatura que na melhor condição de giro o máximo de potencial extraído do vento segundo o limite de Betz é de 59,4%. Assim, quanto melhor for o aproveitamento do giro do rotor mais próximo do limite de Betz a máquina chega e mais energia elétrica poderá ser gerada. E como dito anteriormente, em alturas superiores onde o vento não sofre tanta influência dos obstáculos presentes no solo representa melhor aproveitamento do rotor.

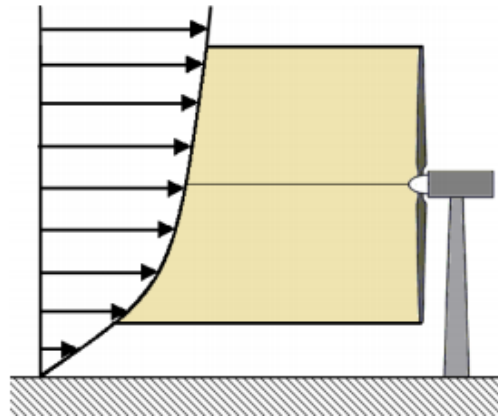


Figura 13: A influência do perfil vertical do vento. (Salvador, 2010)

Assim, a lei da potência caracterizada pelo expoente de gradiente do vento  $\alpha$ , é amplamente utilizada para estudos de potencial eólico, e é descrita pela equação (6).

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (6)$$

Onde:

- $v_2$  é a velocidade do vento que pretende-se determinar de acordo com a altura desejada.
- $v_1$  é a velocidade do vento na altura de referência.
- $h_2$  é a altura para qual pretende-se extrapolar o vento.
- $h_1$  é a altura de referência.
- $\alpha$  é o expoente de gradiente do vento

O expoente de gradiente do vento descreve o perfil de extrapolação de acordo com as características e as condições de relevo onde pretende-se descobrir as velocidades do vento superiores às de referências, e que ocasionalmente pode-se posicionar um aerogerador. A

relação entre o valor do coeficiente do expoente de rugosidade para o tipo de superfície terrestre está na Tabela 1.

*Tabela 1: Valores do expoente de gradiente do vento para diferentes superfícies (Población,2012).*

<b>Descrição da superfície terrestre</b>	<b><math>\alpha</math> (m)</b>
Superfície lisa, lago ou oceano.	0,1
Relva	0,14
Vegetação rasteira (até 0,30m) árvores ocasionais	0,16
Arbustos	0,2
Árvores, construções ocasionais.	0,22-0,24
Áreas residenciais	0,28-0,40

As regiões utilizadas nos estudos de casos do modelo de prospecção, são em áreas litorâneas e, em razão disso o coeficiente de rugosidade empregado leva em consideração o tipo de superfície terrestre que cobre o solo nessas áreas, assim levando em conta as características de cada local e a média das condições de rugosidades presentes.

### **3.2 Distribuição de Probabilidades**

Segundo Sansigolo (2005), os estudos relacionados ao potencial eólico apresentam a necessidade da aplicação de um método de distribuição estatística nos dados de velocidade do vento, para desta forma estimar a energia que poderá ser gerada. É importante que para qualquer análise de dados climatológicos, aplique-se métodos de distribuição de probabilidades, porém considerando que exista metodologias adequadas de acordo com o evento que pretende-se analisar. Utiliza-se muitas vezes a distribuição normal adaptada, porém os dados podem não estar modelados para serem utilizados nessa distribuição e por isso podem resultar em conclusões falsas (Reboita, 2005). Desta forma, a utilização do modelo de distribuição probabilístico adequado é uma ferramenta para representar as condições energéticas do vento no local e, permite conclusões sobre a disponibilidade de vento e estimativa de geração de energia na área (Silva, 2003).

A utilização de um método matemático de distribuição de probabilidade auxilia a engenharia eólica na análise de projetos, por possibilitar que distintas características, ou variáveis da região que impactam no aproveitamento energético, sejam identificadas. Considerando isso, o potencial eólico em um local pode ser prospectado através da distribuição de probabilidade associada. Segundo Sansigolo (2005), a distribuição que apresenta o melhor

resultado nos estudos de potencial eólico é a distribuição de Weibull por ser o modelo que melhor se ajusta aos dados de vento. Existem outros estudos que também sinalizam isto, como os de Justus et al. (1976) e Garcia et al.(1998) que concluem que Weibull é a distribuição que melhor se adapta a prospecção de potencial eólico. Em Feitosa (1993) tem-se a associação entre a distribuição de Weibull e a característica do vento em particular na região Nordeste, apontando que o modelo matemático proposto na distribuição se adapta bem ao comportamento eólico daquela região. Desta forma, a distribuição probabilista utilizada nesse trabalho e aplicada às regiões de estudo de caso é a distribuição de Weibull, por permitir um melhor resultado no procedimento de prospecção.

### **3.3 Distribuição de Weibull**

A distribuição de probabilidade permite que se avalie a probabilidade de ocorrer cada valor de velocidade de vento, o que possibilita descobrir qual a chance de ocorrer os valores de velocidade de vento em uma região considerando uma escala de medição.

A descrição da variação da velocidade do vento é importante para estimar a geração de energia eólica e, para auxiliar os operadores do sistema. Os projetos precisam de um fator de segurança prospectado, para que os estudos informem de que modo e em que local poderão gerar uma demanda maior de eletricidade. A otimização e a minimização dos custos e perdas dos projetos estão diretamente relacionadas com as etapas de investimentos técnicos e econômicos, por isso demandam medidas que economizem esforços gerais e direcionem o aproveitamento para as regiões de maior potencial.

Weibull foi um engenheiro sueco e desenvolveu a distribuição probabilística no ano de 1937 (Silva, 2003). As publicações dos estudos de Weibull permitiram que várias questões e problemas fossem resolvidos. Sabe-se que a distribuição é aplicável em variados questionamentos, que pode ir desde auxílio na produção industrial, avaliação da resistência do aço e análise da estatura dos habitantes das Ilhas Britânicas. Com o passar do tempo e o aprimoramento do modelo por outros matemáticos chegou-se à conclusão que, a distribuição de Weibull é a melhor forma de avaliar falhas mecânicas e também é o método mais confiável para ser aplicado em estudos que requerem confiança da distribuição de probabilidades de ocorrência de um evento, como no caso deste trabalho, o vento. Ela é descrita por uma função analítica que descreve o perfil do vento de forma contínua ao longo de um período de tempo e um intervalo de velocidade de vento (Araújo, 1989).

De acordo com Silva (1999), a função característica de Weibull que descreve a densidade de probabilidade dos eventos ocorrerem, são bastante ajustáveis às variações de vento e, possibilitam a construção de histogramas de distribuição de velocidade com fácil associação ao regime de ventos. Os valores de velocidade obtidos pelos dados de informações são utilizados para calcular os parâmetros que modelam essa ferramenta estatística, os chamados de fatores de escala  $c$  e o fator de forma  $k$ .

Existem alguns aspectos que contribuem para a utilização do modelo de Weibull nos estudos de potencial eólico, e que segundo Silva (2003), podem-se destacar algumas, como:

- Possibilitar uma distribuição em torno do valor médio do vento, possibilitando a descrição do comportamento assimétrico em torno do valor médio central.
- É modelada por dois parâmetros, fatores  $k$  e  $c$ , que apresentam uma interpretação física imediata.
- Os momentos amostrais podem ser expressos pelas funções Gama de Euler, o que facilita o estudo matemático e o ajuste dos parâmetros  $k$  e  $c$ .
- A distribuição de Weibull apresenta uma característica particular, a de englobar outras duas distribuições, a exponencial e de Rayleigh, dependendo de como se ajusta os parâmetros  $k$  e  $c$ .
- A distribuição de Weibull permite que ocorram análises probabilísticas mesmo para ventos extremos.
- Ela é modelada de forma satisfatória para as extrapolações verticais do vento, sendo que se existir os parâmetros  $k$  e  $c$ , de forma determinada para certa altura é possível, fazendo uso de métodos adequados, que esses parâmetros sejam projetados para estudos em alturas superiores.
- Ajusta-se bem a diferentes condições de vento (Azevedo, 2015).

Considerando as características de Weibull quando associada a estudos de potencial eólico, tem-se que o modelo de análise de ocorrência do vento, descreve com boa aproximação a probabilidade de ocorrência dos diversos valores de velocidade (Araújo, 1999) e que podem ser usados para calcular a densidade de potência do vento, o que conseqüentemente possibilita o cálculo da energia estimada. Como o vento é uma variável aleatória contínua que apresenta uma característica estocástica, faz-se necessário a utilização de meios para a discretização desses dados, para a análise do potencial disponível para aproveitamento energético (Custódio, 2009). A distribuição de Weibull é aplicada sobre esse princípio, para generalizar os estudos relacionados à energia eólica, porém se adequando ao modelo de ocorrência dos ventos.

Petry (2007) considera que para série de dados completas, como as de velocidade de vento, a técnica de análise ideal é através da função de Weibull, por ser uma distribuição contínua e que se aproxima de uma distribuição discreta, e por apresentar maior precisão na descrição das condições de vento, levando em conta o perfil intermitente desse recurso natural. Essa função tem embutido o desvio padrão dos dados coletados, o que indica que as informações resultantes levam em conta as incertezas acerca do perfil do vento e da variabilidade dos valores de velocidade estimados a partir dos dados periódicos coletados.

A análise da distribuição das velocidades do vento, quando aplicada ao modelo de distribuição de Weibull, representa a densidade de probabilidade de ocorrer cada velocidade média do vento que pode ser observada na equação (6).

$$v = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (6)$$

Onde:

- $v$  é a densidade de probabilidade de ocorrer a velocidade do vento;
- $f(v)$  representa a função de intensidade do vento.

A densidade de probabilidade da velocidade média do vento é determinada pela função  $f(v)$ , que é a função densidade de probabilidade. Essa função é caracterizada pela probabilidade de ocorrer os valores médios de vento, dentro de uma escala de 1 m/s (Custódio, 2009). Quando o valor de  $v$  cresce de zero até infinito, a função  $f(v)$  também cresce de zero para infinito, o que torna possível uma distribuição acumulada válida (Silva, 2003). A  $f(v)$  é uma função acumulada de Weibull, e ela é descrita pelos parâmetros  $k$  e  $c$ , e permite a representação da probabilidade de existir velocidades de vento menores ou maiores a do valor médio, de acordo com a equação (7), e é descrita da seguinte forma:

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

Onde:

- $f(v)$  é a função acumulada de Weibull;
- $v$  é a velocidade do vento;
- $c$  é o fator de escala;
- $k$  é o fator de forma.



A função  $f(v)$  de probabilidade acumulativa descreve a curva de duração da velocidade do vento (Azevedo, 2015). Considerando isso, a função de ocorrência de Weibull é descrita para diferentes velocidades do vento, considerando os parâmetros  $k$  e  $c$  para cada valor e a densidade de probabilidade de que eles ocorram.

A função densidade de probabilidade de Weibull, equação (8), é representada considerando a distribuição da velocidade do vento dada pela distribuição acumulada e os parâmetros que modelam a ocorrência e o comportamento de vento na região,  $k$  e  $c$ .

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left[\frac{v}{c}\right]^k} \quad \begin{cases} k > 0 \\ c > 1 \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

- $v$  é a velocidade do vento em m/s.
- $c$  é o fator de escala em m/s.
- $k$  é o fator de forma (adimensional).

O fator  $c$ , que é o fator de escala tem relação com a velocidade média do vento e por isso é expresso em m/s, já o fator  $k$  está relacionado com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade central, que é a velocidade média, e desta forma é um parâmetro adimensional (Custódio, 2009). Existem formas de calcular os parâmetros da distribuição de Weibull, o fator de forma e escala, e de acordo com Rohatgi (1994), os métodos mais utilizados são: Método dos Mínimos Quadrados, método da Correlação de  $k$  com a velocidade média e o método empírico, que é utilizado nesse estudo para a aplicação da metodologia de prospecção e que apresenta a velocidade média correlacionada com o  $k$  através da análise do desvio padrão.

### 3.3.1 Parâmetros $k$ e $c$

Quando o parâmetro  $k$  varia, observa-se que as curvas representativas de Weibull se alteram, e além disso, alguns valores específicos quando atribuídos ao fator de forma faz com que a distribuição de probabilidade de Weibull se modifique, podendo ser representada pelas seguintes distribuições:

- Se  $k=1$  pela distribuição exponencial

- Se  $k=2$  pela distribuição de Rayleigh
- Se  $k=3,5$  pela distribuição normal

Os parâmetros não podem ser analisados individualmente. Segundo Silva (2003) quando analisado o comportamento geral da distribuição é possível avaliar as influências divergentes dos parâmetros  $k$  e  $c$ . Quando ocorre o aumento do fator de forma  $k$ , aumenta a constância do vento e quando ocorre o aumento do fator de escala  $c$ , essa constância diminui. Desta forma a interpretação dos parâmetros e a determinação dos mesmo devem ser feitas considerando que existe uma relação entre eles e que os dois são responsáveis por modelar a distribuição.

O fator de escala  $c$ , é em função do fator de forma  $k$ , e é obtido considerando a velocidade média do vento e a função gama, muito utilizada na matemática que também é conhecida com função integral exponencial (Custódio, 2009). Em estudos relacionados à energia eólica ela é utilizada como função do fator de forma de Weibull. Desta forma, se correlacionarmos a equação do desvio padrão (9), com a função Gama, tem-se a equação (10).

$$\sigma = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)^2}$$
(9)

Correlacionando a equação (8) com a equação (9), pode-se verificar a razão entre elas, de acordo com a equação (10).

$$\frac{\sigma^2}{v^2} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1$$
(10)

Determinando a relação  $\frac{\sigma^2}{v^2}$  é possível realizar o processo iterativos para se obter o valor de  $k$ , em função da relação entre o desvio padrão e a velocidade média do vento. Desta forma, o valor  $k$  obtido e, quando localizado entre o intervalo de 1,4 e 3,9 (Salvador, 2012), torna-se possível apresentar valores realista e válidos para aplicações com a finalidade de analisar o potencial eólico (Custódio, 2009). Assim, a relação entre fator de forma ( $k$ ) e os parâmetros citados anteriormente é expressa pela equação (11).

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

Onde:

- S é o desvio padrão
- $\bar{v}$  é a velocidade média dos dados coletados.

A função Gama está relacionada a variação do k, e desta forma apresenta um valor diferente para cada ocorrência do parâmetro de forma, de acordo com o quadro presente na Tabela 2.

Tabela 2: Função Gama (Fonte: Atlas eólico de Minas Gerais)

k	$\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$	k	$\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$
1,6	0,896574	2,5	0,887264
1,7	0,892245	2,6	0,888210
1,8	0,889287	2,7	0,889283
1,9	0,887363	2,8	0,890451
2,0	0,886227	2,9	0,891690
2,1	0,885694	3,0	0,892980
2,2	0,885625	3,5	0,899747
2,3	0,885915	4,0	0,906402
2,4	0,886482	5,0	0,918169

A curva da relação entre o fator k e a função gama é representada na figura 14, e possibilita que valores de gama ou k entre os intervalos pré-determinados pelo quadro anterior sejam estimados.

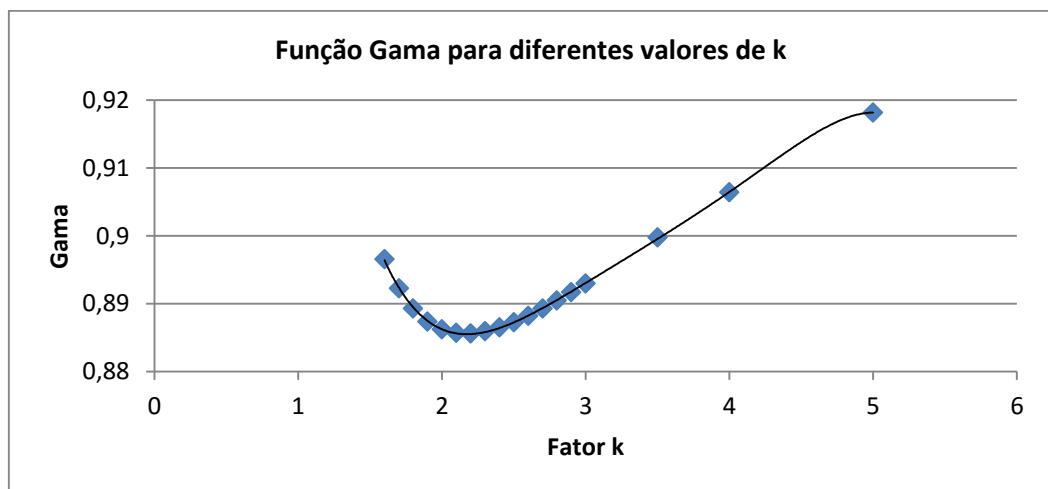


Figura 14: Função Gama para diferentes valores de k.

A função Gama é uma equação representada de acordo com a equação (12).

$$\Gamma(x) = \int_0^1 \left[ \ln\left(\frac{1}{t}\right) \right]^{x-1} dt \text{ onde } x = \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (12)$$

Ela representa uma das mais importantes funções da física e matemática, por possibilitar que vários problemas de engenharia e estatística sejam solucionados. A função gama tem como domínio o conjunto de todos os números reais positivos.

Entre os métodos possíveis de serem aplicados para o cálculo da distribuição de Weibull, Silva (1999) considera que os dados da velocidade de vento e o desvio padrão como grandezas estatísticas que se correlacionam com os parâmetros  $c$  e  $k$ , modelam de forma satisfatória ventos como os que ocorrem no nordeste. De acordo com Almeida (2006), se a média dos valores das velocidades do vento e o desvio padrão são conhecidos, é possível calcular o fator de escala  $c$  através da equação (13), que é uma função que sugere bons índices de aproximação.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (13)$$

Onde:

- $\bar{v}$  é a velocidade média do vento medida para a altura do aerogerador;
- $k$  é o fator de forma;
- $\Gamma$  é a função gama que é uma função amplamente utilizada no meio acadêmico para auxiliar avaliação de parâmetros com que envolvam métodos estatísticos (Caneppele, 2011).

A partir desses parâmetros, pode-se modelar a curva de distribuição do vento. Sendo que o fator  $k$  é responsável pela amplitude da curva e o  $c$  modela a curvatura. O valor de  $k$  é o que indica a regularidade da velocidade média do vento e quanto mais estreita a curva de Weibull será (Castro,2005) (figura 15).

O fator de forma determina a forma da curva de distribuição de Weibull. Esse parâmetro nos dá ideia da regularidade dos ventos, ou seja, quanto maior o valor de  $k$ , maior será a regularidade dos ventos em termos de velocidade média e mais estreita será a curva de

distribuição. O parâmetro de escala,  $c$ , é o fator característico da distribuição, apresenta a mesma unidade de medida que a grandeza analisada, m/s (Castro, 2005).

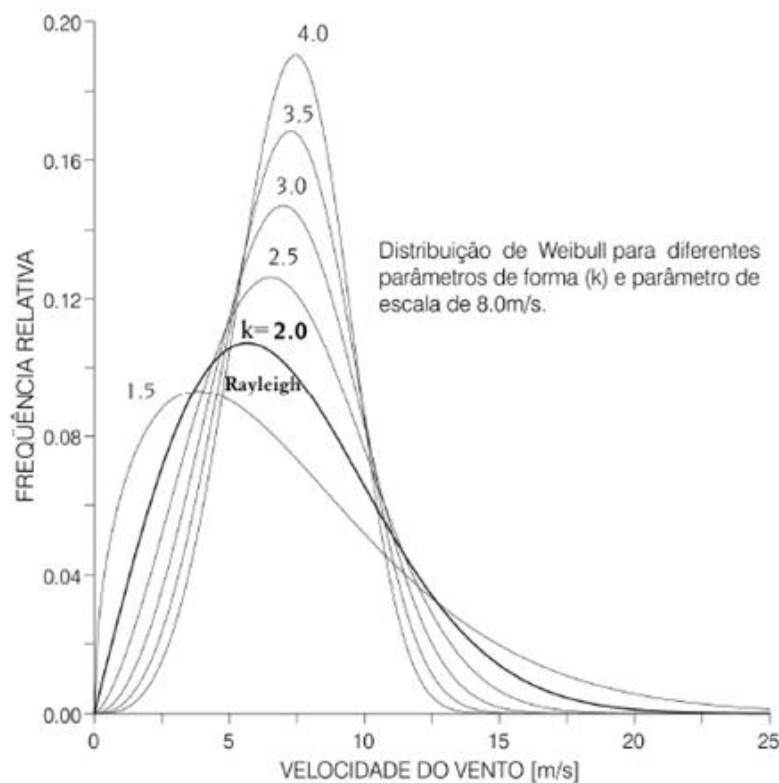


Figura 15: Distribuição de Weibull para diferentes valores de  $k$ . (Castro, 2005)

Analisando a figura 15, a área abaixo da curva é 1, o que representa que a probabilidade total de ocorrer o vento em qualquer velocidade está compreendida no intervalo de mínimo e máximo da velocidade do vento no eixo x. A velocidade média do vento onde ocorre a maior concentração da probabilidade de ocorrer é a mediana da distribuição de Weibull, o que significa que na metade do tempo o vento apresentará velocidades médias menores que ela, e na outra metade do tempo o vento soprará com velocidades superiores a mesma. Isso, porém, não significa que não haverá valores superiores aos valores máximos de vento, mas sim que a probabilidade de que ocorram seja rara.

Weibull tem como parâmetros de entrada os fatores  $k$  e  $c$  que podem ser ajustados para as alturas extrapoladas. Segundo Custódio (2009), é importante que os parâmetros de Weibull sejam de acordo com as novas alturas, isso porque há mudanças no comportamento do vento em função do perfil vertical. Considerando que os dados sobre a velocidade do vento obtidos através do atlas eólico, não apresentam parâmetros para o cálculo do desvio padrão,

aplicou-se a ferramenta de atualização desses dados para ajustá-los às alturas resultantes da extrapolação. Para a atualização desses parâmetros utilizou-se as expressões (14) e (15):

- Para o fator de escala utiliza-se:

$$c_2 = c_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^n \text{ e } n = \frac{0,37 - 0,088 \ln(c_1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (14)$$

- Para o fator de forma:

$$k_2 = k_1 \left( \frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right) \quad (15)$$

Onde:

- $h_1$  é a altura de referência [m];
- $h_2$  é a altura onde se deseja determinar os parâmetros de Weibull [m];
- $c_1$  é o fator de escala na altura  $h_1$  [m/s];
- $c_2$  é o fator de escala na altura  $h_2$  [m/s];
- $k_1$  é o fator de forma na altura  $h_1$  [adimensional];
- $k_2$  é o fator de forma na altura  $h_2$  [adimensional];

Desta forma, como o Cresesb (atlas) disponibiliza os valores de  $k$  e  $c$  para alturas de 50 metros, é possível a atualização dessas informações para as alturas de extrapolação da velocidade média do vento. Isso é necessário para que os dados de entrada da distribuição do Weibull, sejam em função da velocidade do vento para qual pretende-se avaliar a probabilidade estatística de que ocorra a velocidade em um certo período. A função densidade de Weibull é dada pela equação  $f(v)$  que é uma função da velocidade, como apresentado no capítulo de revisão bibliográfica desse trabalho.

Como resultados dos ajustes tem-se a figura 16, que apresenta os valores de adequação dos fatores de forma e escala através da ferramenta apresentada em Custódio (2009),

e a comparação entre os valores anteriores e atualizados na região prospectada no estudo de caso 3, de Paracuru.

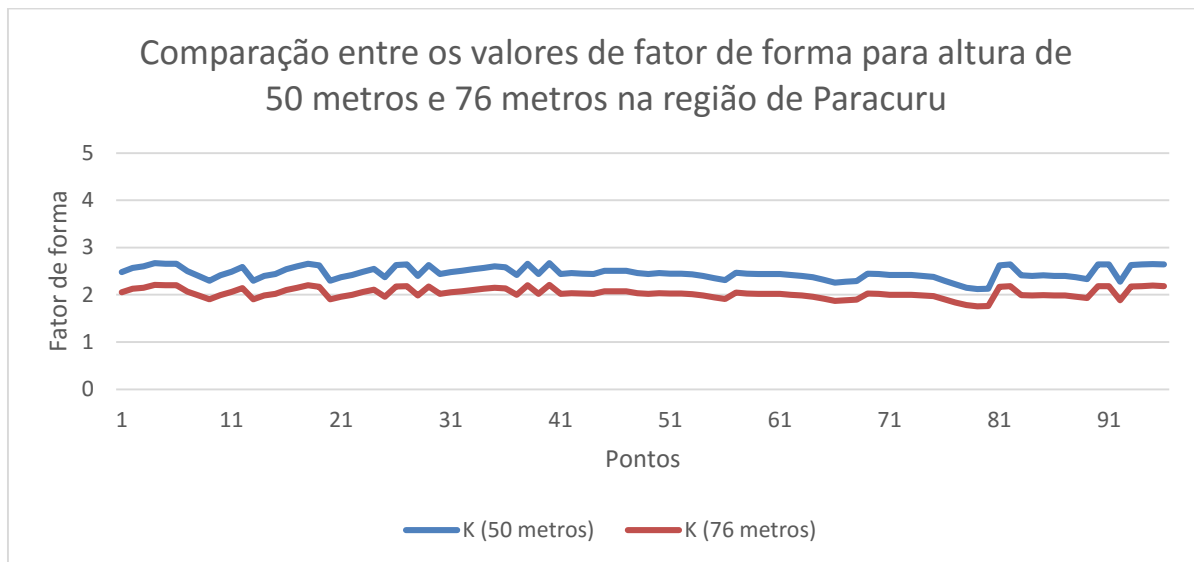


Figura 16: Comparação entre os valores de fator de forma na região para as diferentes alturas.

Para verificar o impacto do k ajustado, sobre o procedimento de distribuição de Weibull tem-se a figura 17, onde apresenta-se as curvas de Weibull para o parâmetro k referente a velocidade do vento inicial, e o fator k ajustado adequadamente para a velocidade de vento extrapolada, essas velocidades são respectivamente, de 7.49 m/s para 9.55 m/s dentro da região de Paracuru no estudo de caso 3.

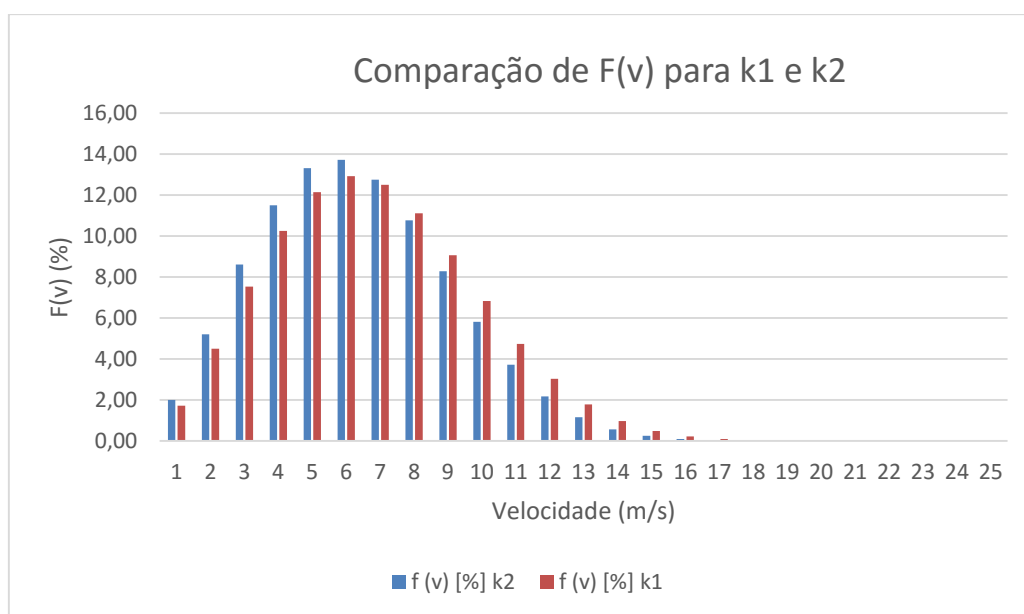


Figura 17: Comparação de k1 e ajuste por k2 na altura h2.

Os dados das séries históricas não necessitam de ajustes para os valores dos parâmetros de Weibull, uma vez que é possível o cálculo do desvio padrão em função da velocidade de vento registrada nos períodos dos anos analisados, e assim a aplicação do método de determinação de  $k$  e  $c$  é feita de acordo com as equações (11) e (13).

### **3.4 Estimativa da energia gerada por um sistema eólico**

O cálculo da energia gerada nas localidades de estudo é feito através da aplicação da distribuição de Weibull. A prospecção da demanda gerada é realizada a partir dos elementos que definem o projeto de geração: o regime local de ventos (através do histograma de velocidade) e da curva de potência do aerogerador (disponibilizada pelo fabricante) (Araújo, 1999). A estimativa de produção anual de energia elétrica é importante tanto no ambiente de dimensionamento técnico, quanto para fins econômicos do projeto. A utilização desse método de prospecção eólica determina e, sinaliza as primeiras incertezas e riscos associados à implantação dos sistemas, funcionando como um processo de filtragem inicial, fornecendo, portanto, a possibilidade de mudanças e otimização do projeto desde a primeira etapa, para que a geração de energia seja maior.

Segundo Custódio (2009) a produção de energia de um aerogerador é um dos principais aspectos dos projetos eólicos e o mais importante fator econômico dos empreendimentos. E em razão disso, é importante que se verifique utilizando ferramentas de prospecção eólica que os empreendimentos em operação geram de energia o valor prospectado e registrado nas etapas de detalhamento do projeto, além disso, essa metodologia tem como finalidade contribuir para que permita-se uma avaliação prévia de sistemas de geração eólica tanto de pequeno ou grande porte, por parte dos investidores. A verificação da estimativa de geração de energia em um sistema contribui com a redução das incertezas na determinação da melhor localidade em função da disponibilidade do vento, para a instalação do aerogerador, reduzindo os erros associados a predição da energia gerada que poderia levar a custos superiores, gerando assim alto risco financeiro.

Com a finalidade de se obter a energia estimada pode-se associar a distribuição de Weibull com a curva de potência da máquina, citada anteriormente no item 3.4. Quando realiza-se a multiplicação da função de densidade de probabilidade pelos valores de potência, obtém-se como resultado a densidade de potência do vento por máquina operante no sistema, (equação (16)) como pode ser visto na figura 18.



$$\text{Densidade de potência} = \sum f(v) * P(v) \tag{16}$$

Para ilustrar o cálculo da densidade de potência podemos considerar de acordo com a figuras 18 e 19, de função de densidade de probabilidade e a curva de potência do aerogerador, respectivamente, como deverá ser representada a densidade de potência para se obter o cálculo da energia estimada em um estudo de prospecção utilizando distribuição de Weibull.

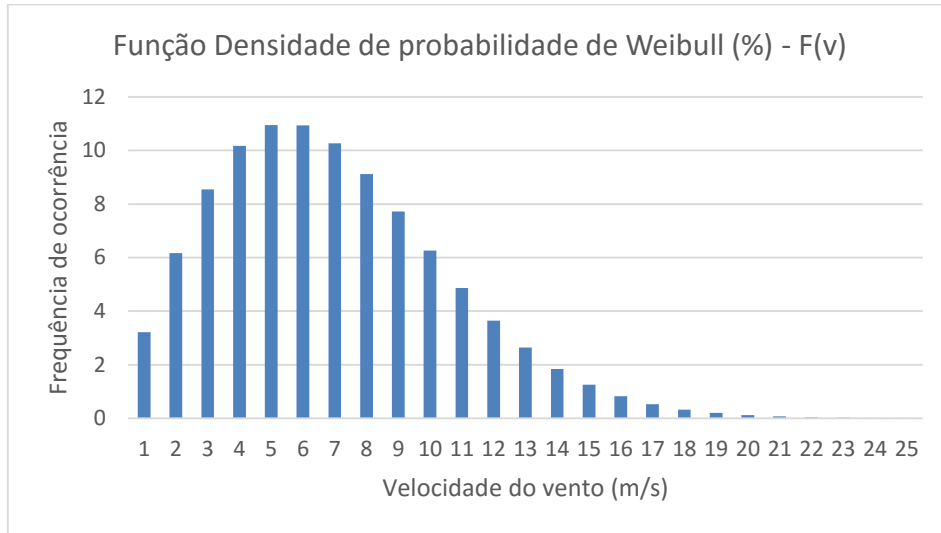


Figura 18: Curva da função de ocorrência de Weibull para a velocidade média do vento de 7 m/s.

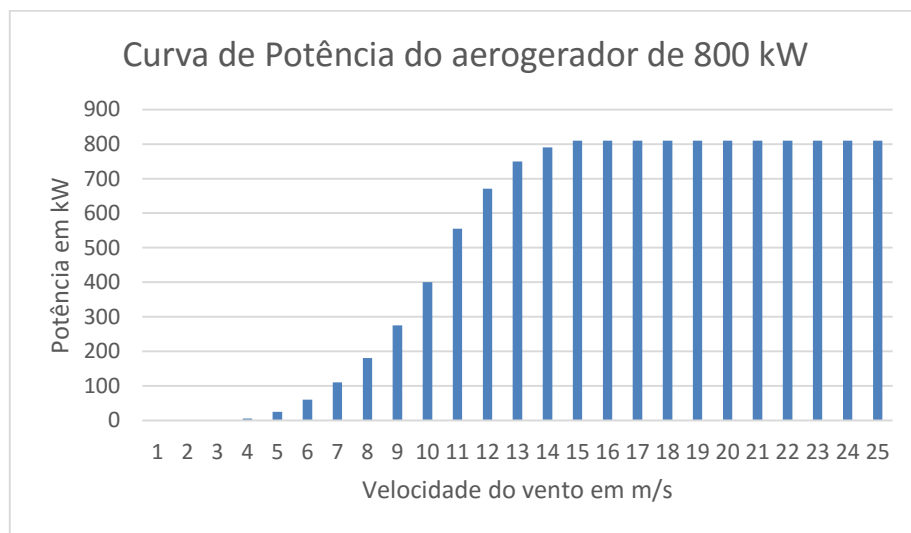


Figura 19: Curva de Potência do aerogerador de 800 kW

Considerando as curvas contidas nas figuras anteriores é possível determinar a densidade de potência do local para a velocidade média do vento de 7 m/s e utilizando um aerogerador de 800 kW, como apresentado na figura 20.

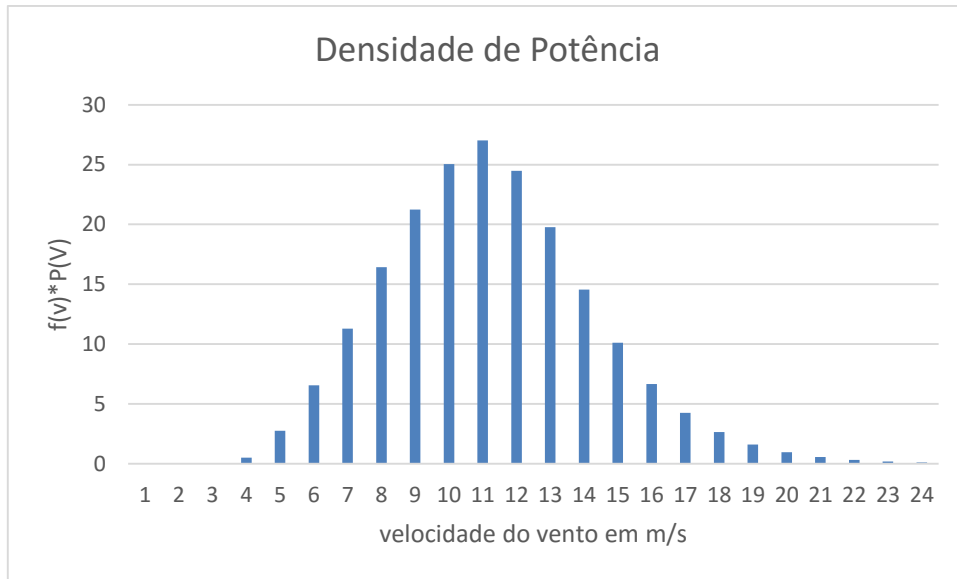


Figura 20: Curva de  $f(v) * P(v)$ .

A energia gerada por um sistema é em função da distribuição de potência, uma vez que a energia é a disponibilidade de potência por um determinado período de tempo. A EAG que é a energia anual gerada por uma turbina ou uma área disponibilizada para exploração eólica é dada de acordo com a equação (17).

$$E_{anual} = \sum f(v) * P(v). 8760 \quad (17)$$

Onde:

- $f(v)$  é a densidade de probabilidade de Weibull;
- $P(v)$  é a potência do aerogerador;
- 8760 é a quantidade de horas no ano.

Quando se estima a energia que poderá ser gerada, tem-se a prospecção do potencial de um parque eólico ou de um empreendimento de pequeno porte, porém, também tem a finalidade de descrever qual a capacidade de geração das máquinas instaladas no terreno. Os principais aspectos que podem interferir na prospecção da geração de energia são:

- Utilização de uma metodologia de prospecção inadequada e que não se ajuste bem ao comportamento do vento local.

- Utilização de estimadores ou dados com desvios para o cálculo dos parâmetros que modelam o sistema.
- Não possuir uma distribuição centrada em torno de um valor médio, o que permitiria descrever o comportamento assimétrico em torno desse valor de mediana.
- Em aplicações de estimativa de geração eólica, é importante que a curva de geração média das turbinas eólicas estejam ajustadas as distribuições de probabilidades e apresentem velocidade do vento e geração de energia dentro do mesmo intervalo de velocidade do vento.
- Não considerar para efeito de prospecção os registros de ocorrência de calmarias, que podem ser definidas como o intervalo onde a velocidade do vento é menor que o limite inferior da banda de medição do anemômetro, normalmente entre 0,5 m/s e 2 m/s (Silva, 2003).

Sendo assim, a energia elétrica obtida de um aerogerador será calculada através da curva de potência e, dos parâmetros que irão modelar a distribuição de velocidades do vento, que fornecerá a interação entre a série temporal em frequências de ocorrências das velocidades do vento, com o intervalo de aplicação e distribuição de potência por m/s. Multiplicando cada ocorrência de vento da distribuição de velocidade obtida por Weibull, com a curva de potência da máquina, pelo total de horas de operação resultará na energia estimada de geração.

### 3.5 Fator de capacidade

O fator de capacidade (FC) é o quociente da relação entre a produção de energia líquida anual e a energia teórica da máquina. Ou seja, o fator de capacidade é o indicador entre a energia efetivamente gerada pelo sistema e a energia que teoricamente ele disponibilizaria se operasse em tempo integral com a potência nominal, durante as 8760 horas do ano.

Esse índice é uma importante forma de avaliar o potencial eólico de uma determinada região. Ele pode ser entendido na metodologia de prospecção como o percentual de aproveitamento estimado em relação a potência máxima instalada, e dependente diretamente das características do local e do aerogerador utilizado. O FC (equação (18)) traduz a qualidade de um projeto que possa vir a ser instalado na localidade devido ao potencial eólico disponível e o desempenho da turbina empregada.

$$FC = \frac{EAG}{P_{Nominal} \cdot 8760}$$

(18)

Onde:

- EAG é a energia estimada no período de um ano;
- $P_{Nominal}$  é a potência nominal da máquina;
- 8760 é a quantidade de horas em um ano.

Desta forma, o fator de capacidade de um sistema de geração está relacionado a produção efetiva de uma usina em um determinado período de tempo, e a capacidade máxima nesse mesmo período. A principal variável que pode interferir no FC é a disponibilidade do vento e sua característica.

## **3.6 Métodos utilizados no tratamento dos dados de prospecção**

### **3.6.1 Tratamento dos dados prospectados**

Os dados coletados para a prospecção de potencial nas regiões dos parques que estão em operação são informações pontuais e, resultantes de uma malha de vento disponibilizada pelo atlas de potencial eólico e, pela medida pontual de velocidade de vento ocorrida nas estações meteorológicas registradas nos anemômetros instalados. Desta forma, para que ocorra a possibilidade de avaliar a região quanto ao potencial, representada como uma superfície de informações existe a necessidade de que esses dados pontuais, sejam trabalhados e assim, reproduzam informações relacionadas ao potencial energético na forma de um *raster*. Para que esses dados possam ser trabalhados em forma de superfícies, é necessário o emprego de métodos matemáticos aplicados aos *softwares* de SIG (Sistema de Informações Geográficas), que representam procedimentos para permitir que análises da gestão de recursos e/ou fenômenos, sejam representados de forma computacional. O SIG é um sistema constituído por um conjunto de ferramentas, para a integração de dados que tem o objetivo de coletar, armazenar, manipular e permitir a visualização, para a análise de dados georreferenciados em um espaço.

Esse tipo de recurso permite utilizar e trabalhar informações atribuindo valores aos pontos, e avaliando a possibilidade de utilização de um local para exploração energética, através da combinação de dados prospectados com as informações espaciais da região.

O SIG possibilita a visualização e ajustes da utilização do vento e o valor da velocidade do vento nas localidades escolhidas para os estudos de casos deste trabalho. Utilizando os recursos do *software* para a elaboração de malhas de dados de vento, é possível a aplicação para verificação dos parâmetros energéticos que poderão ser alcançados na região. Para tal finalidade, utiliza-se o *software* ARCGIS® que permite o agrupamento de informações, em forma de funções, para que sejam compilados geograficamente e assim, retorne como resultado informações geográficas mapeadas através do gerenciamento das informações resultantes da prospecção aplicada, como visto no capítulo 5.

### 3.7 Interpolação IDW

A interpolação utilizada no estudo é a IDW (Inverse Distance Weighted-Ponderação do Inverso da Distância), denominada como modelo estatístico do “Inverso das Distâncias”. Esse modelo leva em conta a dependência espacial dos pontos próximos uns dos outros, ou seja, supõe que quanto mais próximo um ponto estiver do outro maior será a correlação entre seus valores (Varella et al., 2000). Com isso os pesos atribuídos as amostras que se encontram próximos, são maiores do que os valores atribuídos aos pontos mais distantes.

Desta forma, o modelo aplica o seguinte meio para a determinação dos valores interpolados: Multiplica os valores de amostras pelo inversa das respectivas distâncias ao ponto de referência para a interpolação. Essa técnica determina os valores dos pontos interpolados, utilizando combinação linear ponderada dos pontos amostrados, e assim o peso de cada ponto é o inverso da função distância entre eles (Marcuzzo et al., 2011). O IDW é um método proposto e que combina a ideia de proximidade, considerando que os pontos mais próximos serão semelhantes e mais diferentes do que os pontos que estão mais distantes (Santana, 2014). Ele é dado pela equação (19).

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (19)$$

Onde:

- z são os valores estimados.
- n é o número de amostras.
- z<sub>i</sub> os valores conhecidos;

- $d_i$  são as distâncias entre os valores conhecidos e estimados.

O peso de cada amostra é determinado acrescentando o fator peso ( $p$ ) como na equação (20), e assim quando a distância é maior o peso é reduzido e, quando a distância for menor o peso da função é aumentado. Os pesos da malha interpolada são parametrizados de acordo com a distância entre os pontos de referências e os pontos interpolados e assim sua soma será igual a 1 (Santana, 2014).

$$z_p = \frac{d_{i_0}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{i_0}^{-p}} \quad (20)$$

Desta forma, a equação (19) é a equação (20) em função dos pesos para as distâncias dos pontos, com essa modificação é possível atribuir diferentes pesos e quanto maior for ele maior será a influencia na amostra mais próxima do valor estimado.

### 3.8 Ferramentas de SIG

O *ArcView* é uma área de atividade do *ARCGIS*® e apresenta as opções de interface do *software* e as ferramentas de auxílio para a elaboração dos mapas rasters. Entre essas ferramentas tem-se a base de interpoladores disponíveis, e para este trabalho como citado anteriormente, o utilizado é o interpolador IDW.

A velocidade escalar do vento aplicada na interface do software, permite valores médios globais através da interpolação para cada ponto da grade de 0.5 km amostrado, para a elaboração de mapas com a melhor qualidade e nível de informações possíveis. Desta forma, apresentando de acordo com a escala Beaufort de ventos, definida de ar leve até ventos fortes (Santana, 2014), observa-se que na malha de superfície gerada é possível avaliar por área em  $m^2$  as regiões com maior potencial eólico, ou seja, as áreas mais propícias para a instalação de aerogeradores e que apresentam velocidades maiores de vento.

A utilização de SIG permite que os resultados sejam analisados através de informações contidas em mapas temáticos, constituídos pelos valores prospectados a partir do procedimento. O *ArcGis*® é uma ferramenta da *ESRI for Windows* que possibilita capturar, armazenar, analisar e imprimir dados georreferenciados espacialmente em relação a composição e uso e ocupação da superfície do solo (Polizel, 2007).

Na figura 21, adaptada de Polizel(2007), apresenta-se as principais etapas para a elaboração dos mapas, baseando-se nas necessidades dos estudos de prospecção de potencial eólico e, que tem a finalidade de auxiliar a identificação das áreas disponíveis para a geração de energia eólica. Considerando que existam divisões entre as cidades e áreas alagadas, como no mar que apenas seria possível a instalação de sistemas offshore. A velocidade do vento durante o processo de prospecção é considerada uma função pontual e, quando aplicado o modelo do *software* permite a criação de uma malha *raster*, tornando de fácil visualização o resultado da prospecção de potencial. O mesmo acontece nos mapas de detalhamento da disponibilidade de outras fontes energéticas sobre algum território, porém o que se apresenta nesse estudo é uma alternativa acessível para a construção desse tipo de informação e, a possibilidade de que as análises sejam feitas em regiões onde ainda não se verificou o potencial energético contido nos ventos. Além disso, a utilização desse modelo agrega conteúdo ao método de prospecção, fornecendo a utilização de uma ferramenta visual para a tomada de decisões.

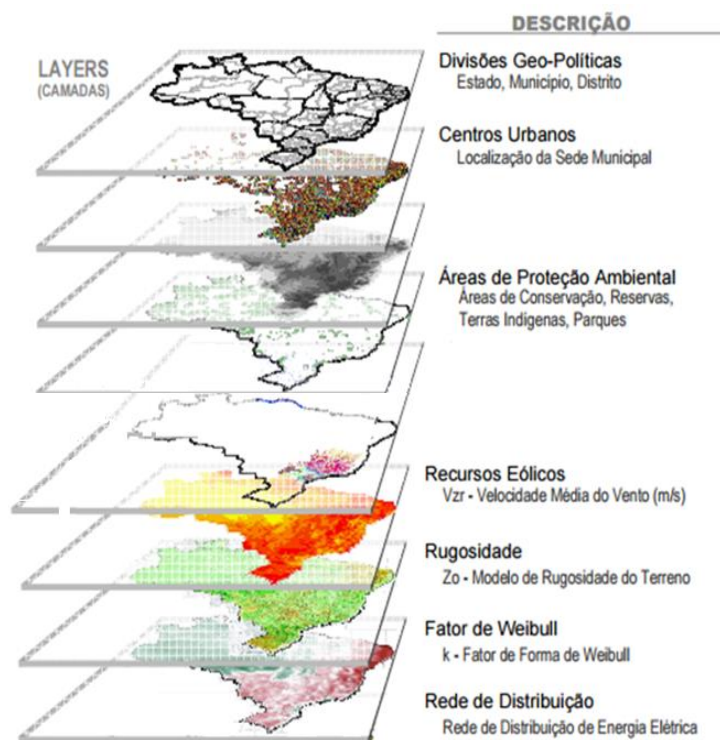


Figura 21: Variáveis temáticas inseridas no ARCGIS® para detalhamento dos mapas de potencial eólico. (Fonte: Polizel,2007) (Adaptado de Polizel, 2007).

## **4. Contextualização das regiões de estudo**

### **4.1 Determinação das regiões para estudo de caso**

As regiões determinadas para os estudos de casos foram escolhidas considerando a disponibilidade do vento e a facilidade para a comparação entre os dados resultantes do processo de prospecção e, os valores reais de operação dos parques e de medições do vento, localizados nessas áreas. Alguns parâmetros importantes foram verificados, como as características de cobertura do solo, a morfologia do terreno, a disponibilidade de dados de vento, localização favorável para o fornecimento de energia para o SIN, existência de empreendimentos em operação e de parâmetros dos empreendimentos disponibilizados pelas concessionárias ou pelos órgãos responsáveis, e interesse em analisar as regiões que apresentam maior potencial para a geração de energia.

Desta forma, observando as características anteriores e buscando alcançar o objetivo do estudo, as áreas escolhidas são aquelas que apresentam parques eólicos instalados e que possibilitam a aplicação da metodologia com a finalidade de que os valores resultantes da prospecção sejam validados com dados reais. Estão localizadas preferencialmente na região Nordeste, isso porque, essa região é favorecida em características eólicas, assim como, em radiação solar.

Além dessas variáveis analisadas, buscou-se por regiões onde há monitoramento das condições climatológicas através de bases de coletas de informações constituídas por estações meteorológicas registradas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA), isso porque é necessário dados de entrada para aplicação da metodologia, e como essa pesquisa trata-se de um estudo acadêmico e teórico sobre o comportamento da metodologia de prospecção, com a inserção desses dados como informações de entrada, é necessário que existam bases meteorológicas com informações disponíveis. Os dados obtidos nos bancos de informações e coletados a partir das estações são registrados em intervalos diários e são armazenados em séries históricas de informações das características climáticas dos locais.

Assim, com as informações disponíveis acerca do vento nas estações meteorológicas próximas as áreas, e os dados do atlas fornecidos pelo Cresesb, pode-se comparar os valores de fator de capacidade prospectado com os valores medidos e registrados como parâmetro dos projetos. O estudo utiliza a metodologia de prospecção combinada ao



método de interpolação, utilizando o *software* de SIG, e por isso após a aplicação matemática e obtenção dos mapas temáticos de velocidade do vento e fator de capacidade, buscou-se comparar os resultados prospectados com os valores reais, isso devido à possibilidade de identificação através do *software* dos resultados exatamente em um ponto específico, neste caso, onde existe um parque eólico em operação.

A comparação entre os resultados prospectados através da metodologia devido as aplicações matemáticas sobre os dados de entrada disponibilizados pelos bancos de dados, serão comparados com os dados de operação de parques nas regiões dos estudos de casos, para que seja possível avaliar o desvio entre as informações, e desta forma possibilitar a avaliação da incerteza do método aplicado, quando utiliza-se como dados de referência os disponibilizados pelos bancos de informações acessíveis ao meio acadêmico, que consistem no SINDA e atlas eólico.

#### 4.1.1 Região de Camocim

A Usina de Energia Eólica de Praia Formosa está localizada no município de Camocim no estado do Ceará. Com capacidade instalada de 104,4 MW, sendo 50 máquinas da *Suzlon* de modelo S88 2MW, atinge em média um fator de capacidade de 39%, de acordo com os Relatórios mensais disponibilizados no site da ANEEL ([www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)).

O vento na região de Camocim apresenta médias consideradas razoáveis para a exploração com a finalidade de gerar eletricidade, de aproximadamente 6,4 m/s a altura de 50 m, de acordo com a figura 22, e as maiores médias de vento ocorrem principalmente nos meses da primavera.

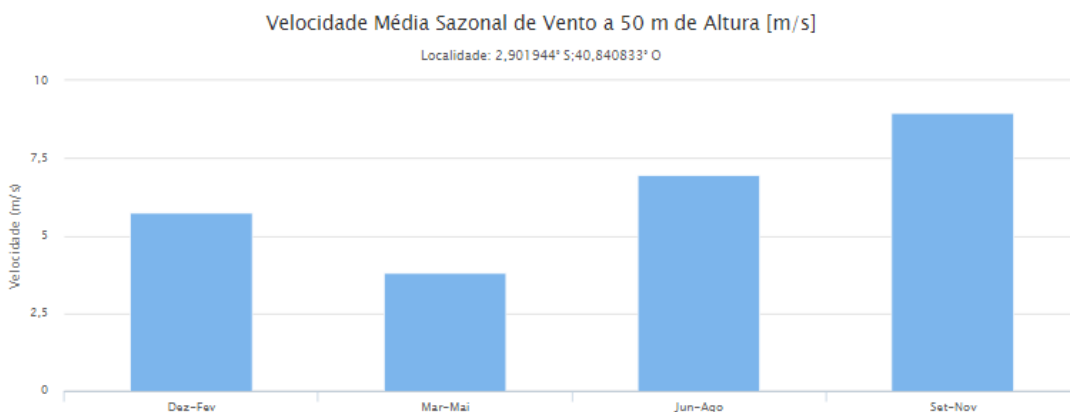


Figura 22: Média da velocidade do vento por estação do ano a uma altura de 50 metros na região de Camocim. (Cresesb)

As estações meteorológicas utilizadas no estudo são:

- Estação de Camocim (Lat 2°54'11.13"S; Lon 40°51'18.11"W)
- Estação de Granja (Lat 3°7'27.47"S, Lon 40°49'47.85"W)
- Estação de Jijoca (Lat 2°53'59.40"S, Lon 40°27'4.23"W)

Estas localizadas de acordo com a figura 23.



Figura 23: Região de Camocim, utilizada para a aplicação do modelo de prospecção do potencial eólico.  
(Google Earth)

#### 4.1.2 Região de Beberibe

A Central Eólica de Beberibe está localizada na cidade de Beberibe no estado do Ceará. Com capacidade instalada de 25,6 MW, sendo 32 máquinas da *Wobben Enercon* de modelo E-48 800kW. A licença de Operação dessa Central Eólica é da empresa Tractebel Energia e está em atividade desde agosto de 2009, o que contribuiu para que o Ceará se tornasse o maior estado em capacidade de geração de eletricidade através do vento, no território nacional.

No período de construção do parque eólico, cerca de 3000 mil empregos diretos e indiretos foram criados na região (Info Online, 2010), que tem a economia baseada principalmente na cultura de cana de açúcar, caju, mandioca e milho. Existem ainda terras que apresentam minerais importantes como Quartzo e Feldspato, mas que não representam volumes de movimentação econômica significativos. Além disso, existem indústrias de tijolos, vestuário e calçados. A economia da cidade também é sustentada pelas belezas naturais e de suas atrações turísticas, principalmente na Praia de Morro Branco, onde se localiza o principal parque eólico de Beberibe, e na Praia das Fontes.

Como o trabalho busca verificar o resultado da prospecção do potencial energético juntamente com os dados reais das regiões, o levantamento dessas áreas tem a finalidade de aplicar o modelo e permitir a validação da metodologia de prospecção de potencial eólico. Para isso utilizou-se uma malha composta por pontos de amostra de informações retiradas do banco de dados do Cresesb e 5 estações meteorológicas. De acordo com a figura 24, tem-se o mapa da área de estudo onde foi aplicada a metodologia para a verificação da viabilidade do uso dos dados das estações meteorológicas para o levantamento da estimativa de potencial. A região delimitada pelo retângulo onde se encontra a área de prospecção e o marcador amarelo indica a localização do parque em operação, que tem a finalidade de permitir a verificação e comparação entre os dados prospectados e os dados reais de registro do projeto.

As estações meteorológicas utilizadas no estudo são:

- Estação de Beberibe (Lat 4°10'49.33"S, Lon 38° 7'31.20"O)
- Estação de Caucaia (Lat 3°42'7.99"S, Lon 38°54'43.74"O)
- Estação de Jaguaruana (Lat 4°53'3.84"S, Lon 37°46'48.43"O)
- Estação de Pacajus (Lat 4°11'38.49"S, Lon 38°31'36.06"O)
- Estação de Morada Nova (Lat 5° 9'24.75"S, Lon 38°22'30.37"O)



*Figura 24: Região da Central Eólica de Beberibe, utilizada para a aplicação do modelo de prospecção do potencial eólico. ( Google Earth)*

O vento na região de Beberibe apresenta médias de velocidades consideradas razoáveis para a exploração com a finalidade de gerar eletricidade, de aproximadamente 7 m/s a altura de 50 m, e as maiores médias de vento ocorrem principalmente nos meses da primavera, figura 25.

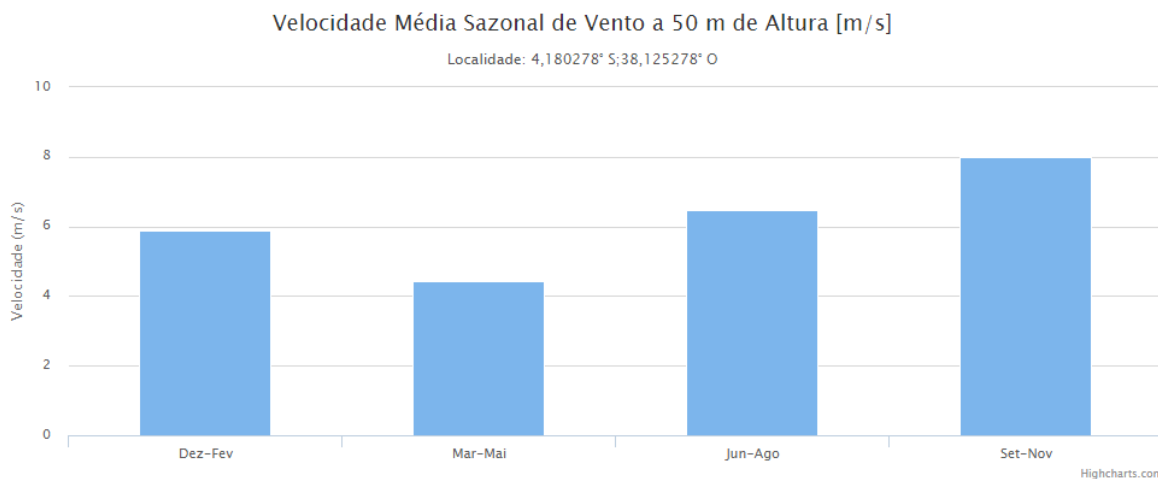


Figura 25: Médias de velocidade do vento por período do ano a altura de 50 metros. (Cresesb)

### 4.1.3 Região de Paracuru

O Parque Eólico de Paracuru está localizado na cidade de Paracuru no Ceará. Ele apresenta a potência instalada de 25,50 MW através de 12 aerogeradores de potência 2MW da marca *Suzlon*. Ele atende um volume de consumidores próximo a 384 mil pessoas e está localizado em estradas de acesso e linhas de transmissão. A empresa que obtém os direitos de concessão do parque é a CPFL.

A velocidade média na região de Paracuru é de aproximadamente 7,16 metros por segundo, e com médias equivalentes a 9,46 m/s na primavera, onde apresenta o melhor potencial eólico ao longo do ano. Na figura 26, pode-se observar o perfil médio do vento na região de Paracuru.

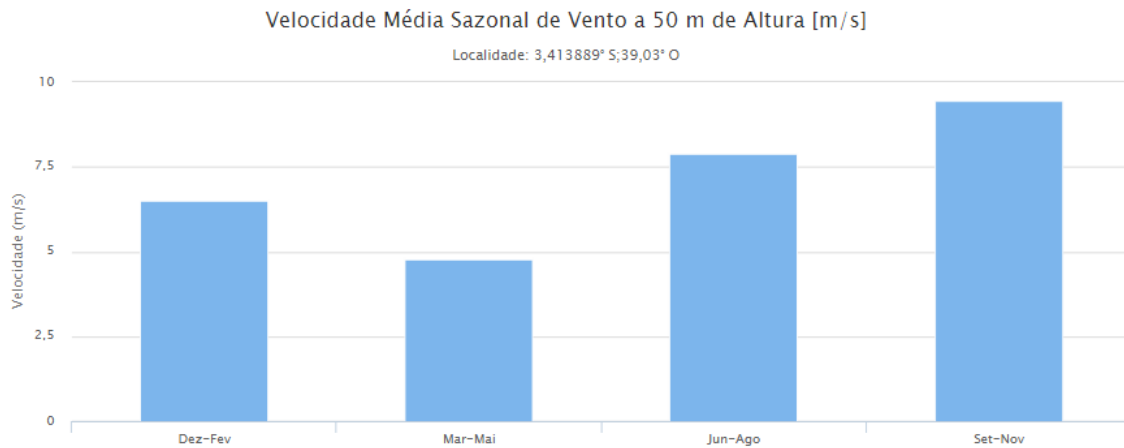


Figura 26: Média da velocidade do vento por estação do ano a uma altura de 50 metros na região de Paracuru. (Cresesb)

As estações meteorológicas utilizadas no estudo são as seguintes:

- Estação de Caucaia (Lat 3°42'7.99"S, Lon 38°54'43.74"O)
- Estação de Maranguape (Lat 3°53' 33.93 e Lon 38°40'59.31''O)
- Estação de São Gonçalo do Amarante (3°36'26.62''S e Lon 38°58'7.50''O)
- Estação de Pentecoste (Lat 3°47'25.90''S e Lon 39°16'7.78''O)
- 

A figura 27 apresenta a localização das estações no mapa.

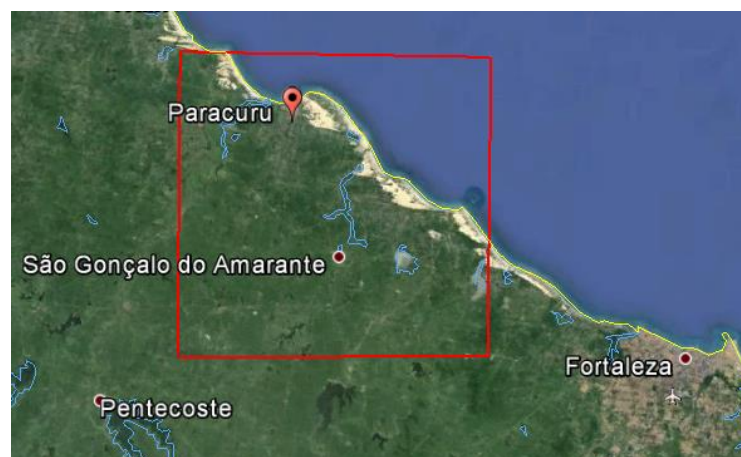


Figura 27: Região de Paracuru, utilizada para a aplicação do modelo de prospecção do potencial eólico. (Google Earth)

## 5. Resultados

### 5.1 Resultados do método de prospecção

Os resultados do método de prospecção são baseados nos valores obtidos através da prospecção de potencial eólico nas regiões citadas no capítulo anterior. Para isso considerou-se como dados de entrada as informações obtidas do Cresesb (atlas) e das estações meteorológicas. Os valores de velocidade do vento para as alturas iniciais foram extrapolados considerando as características da região através da extrapolação que leva em conta o perfil vertical do vento. As alturas de referências para a  $h_2$  do modelo de extrapolação, equação (5), foram consideradas as das alturas das máquinas que estão em operação nos parques localizados dentro das áreas dos estudos de caso, e estão presentes no quadro da Tabela 3.

Tabela 3: Quadro das alturas de extrapolação.

<b>Região</b>	<b>Altura de extrapolação</b>	<b>Modelo da Máquina</b>
<i>Região de Camocim</i>	100 m	2,1 MW
<i>Região de Beberibe</i>	76 m	800 kW
<i>Região de Paracuru</i>	100 m	2,1 MW

Quando as velocidades para as alturas das máquinas de estudo são calculadas, possibilita-se que o método de distribuição estatística seja aplicado. Para a determinação do coeficiente de rugosidade, considerou-se um valor médio para cada região de estudo, conforme as características apresentadas e observando a Tabela 1. Desta forma os valores médios adotados para cada região foram: Região de Beberibe igual a 0,4 m; Região de Camocim igual a 0,3 m e Paracuru 0,3 m. Essa média foi obtida verificando a região, o tamanho da área de prospecção e a cobertura do solo, e ainda de acordo com as informações contidas na literatura sobre o estudo.

Alguns aspectos foram utilizados para aplicação do modelo de prospecção:

- De acordo com Silva (2003), o intervalo de calmaria considerada para estudos eólicos, apresenta velocidades médias entre 0,5 e 3 m/s. Para efeito de filtragem de possíveis falhas dos sistemas das estações meteorológicas, baseando em revisões bibliográficas descartou-se valores de vento inferiores a 2,5 m/s.
- Valores muito altos do vento, que podem ser considerados como distorções das medições realizadas foram descartados.

- Considerou-se para esse estudo um perfil de atmosfera neutra.
- Utilizou-se dados de estações meteorológicas em operação e com capacidade de registro dos dados em uma série histórica.
  - Foram utilizadas as séries históricas do vento nas estações que apresentassem melhor perfil de qualidade no funcionamento dos equipamentos.
  - Utilizou-se estações localizadas dentro das áreas de pontos amostrais, com a finalidade de inserir informações reais e melhorar o fator de interpolação entre esses dados.

Desta forma, com a finalidade de verificar a relação entre a metodologia de prospecção, utilizando a extrapolação vertical e a interpolação dos dados com valores reais, é necessário considerar alguns aspectos:

- A extrapolação vertical do vento é realizada para nivelar os dados de vento para o mesmo patamar, ou seja, possibilitar que os dados de entrada estejam nivelados em altura e considerando a rugosidade do local.
  - Os parâmetros de Weibull são dependentes da velocidade extrapolada.
  - Foram utilizadas 3 regiões de estudo, para possibilitar maiores análises e conclusões sobre a distribuição, considerando como entrada os dados utilizados.
  - Para todas as regiões foram utilizados dados de vento do atlas eólico e em média 3 estações meteorológicas, com a finalidade de diminuir o intervalo entre a interpolação.
  - A interpolação IDW foi realizada considerando 0,5 km de resolução no *software Arcgis®*.
  - Os mapas gerados no estudo têm a finalidade de auxiliar na comparação da utilização de interpolação sobre a distribuição de Weibull, com dados reais de alguns pontos de referência dentro das regiões de estudo.

## **5.2 Análise da velocidade do vento na região dos parques eólicos**

Os estudos de casos do trabalho buscam verificar se o valor da velocidade do vento, obtido pela extrapolação matemática do modelo de prospecção, pode ser utilizado como parâmetro preliminar de análise para fins energéticos. Os mapas de velocidade são para apresentar o perfil do vento utilizado para a prospecção energética e o cálculo do fator de capacidade na região.

### 5.2.1 Região de Camocim

A velocidade do vento na região de estudo de Camocim foi obtida através da extrapolação dos valores referentes aos pontos do atlas e a utilização de informações contidas nas 3 estações meteorológicas da região. Levando em conta a rugosidade do terreno e utilizando como referência, os dados de vento das estações a 10 metros de altura e para os dados do atlas a 50 metros de altura, pode ser observado no mapa da figura 28.

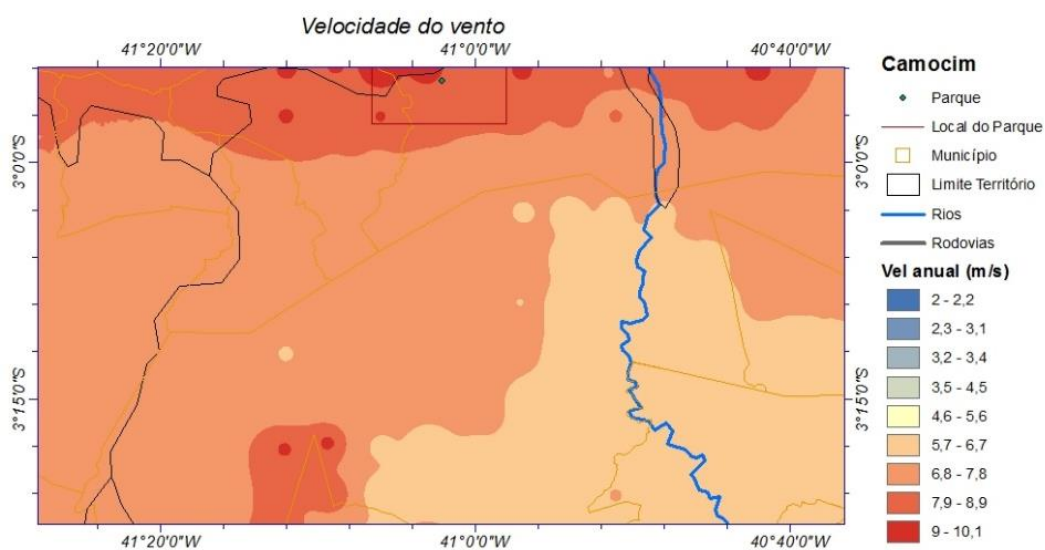


Figura 28: Mapa para a velocidade do vento na região de Camocim.

Da mesma forma a velocidade do vento obtida através da extrapolação e interpolação dos dados foi comparada para a região onde há um parque instalado, isso porque o único parâmetro real possível de ser comparado na área de estudo, é o obtido pela concessionária no período de aferição do vento para o projeto dos parques. O modelo de extrapolação apresenta uma média do vento próximo a 8 m/s, maior se comparado aos 7,07 m/s dos registros do parque. E como pode ser observado na figura 28, existe uma grande área com médias de vento ente 8 m/s e 9 m/s, e como afirmado anteriormente, apresentando-se boa para a exploração energética.

### 5.2.2 Região de Beberibe

A velocidade do vento na região de estudo de Beberibe foi obtida através da extrapolação da velocidade de vento dos dados coletados nas 5 estações meteorológicas e no



Cresesb (atlas). Levando em conta o fator de rugosidade médio do terreno e, utilizando como referência os dados de vento das estações a 10 metros de altura, e para os dados do atlas a 50 metros de altura, de acordo com o mapa da figura 29.

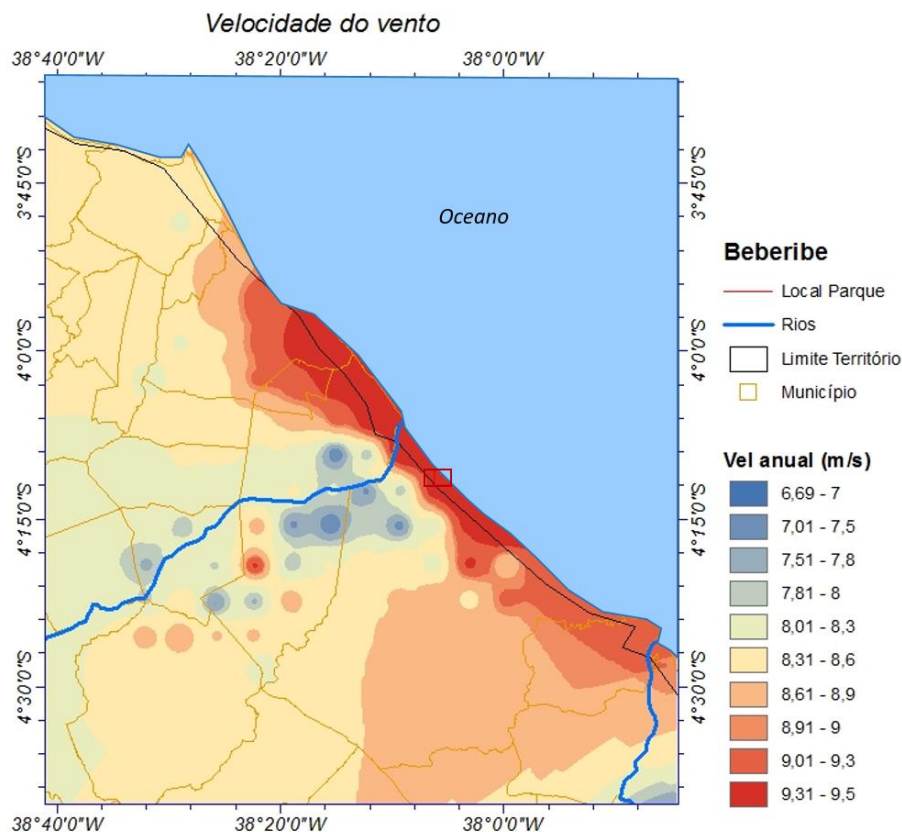
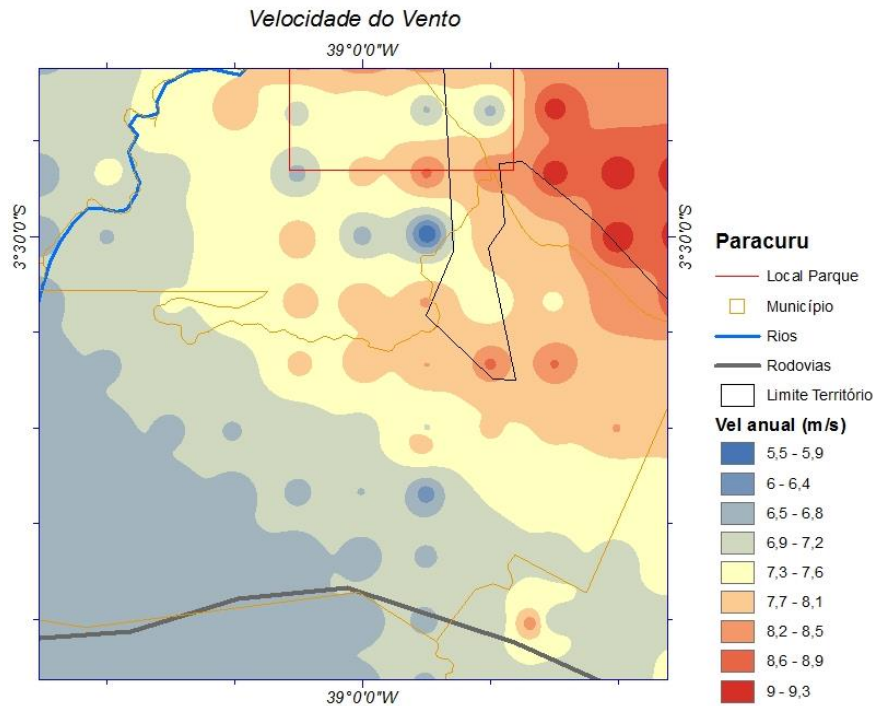


Figura 29: Mapa de velocidade do vento na região da CE Beberibe.

A velocidade do vento na região apresenta uma grande área com médias entre 8 e 9 m/s, que segundo a ANEEL pode ser considerada boa para a exploração energética. Onde está assinalado o local do parque da Central Eólica, mostrou que para a altura de 76 metros, a velocidade do vento é cerca de 9,33 m/s, Figura 28, maior do que a registrada no mesmo local pela concessionária do parque durante o período de projeto e aferição do vento no local que é de 8,5 m/s.

### 5.2.3 Região de Paracuru

A velocidade do vento na região de estudo de Paracuru, foi obtida através da extrapolação dos pontos do atlas e a utilização de informações contidas nas 4 estações meteorológicas da região. Levando em conta a rugosidade do terreno e utilizando com referência os dados de vento das estações a 10 metros de altura e, para os dados do atlas a 50 metros de altura, tem-se o mapa da figura 30.



*Figura 30: Velocidade do vento na região de Paracuru.*

A velocidade do vento obtida através da extrapolação e interpolação dos dados foi comparada para a região onde há um parque instalado, assim como nos itens anteriores, isso porque o único parâmetro real possível de ser comparado na área de estudo é obtido através dados de projetos, devido a aferição da concessionária. O modelo de extrapolação apresenta média do vento próximo a 8,23 m/s, maior se comparado aos 7,26 m/s de registro do parque.

### **5.3 Análise do Fator de Capacidade na região dos parques eólicos**

O fator de capacidade é um índice utilizado como forma de avaliar o potencial de geração de uma determinada fonte de energia, no caso desse estudo utiliza-se o fator de capacidade para verificar qual é o percentual de aproveitamento estimado da potência máxima instalada, de acordo com as características dos aerogeradores utilizados em cada caso, Anexo A. Nos estudos de casos, busca-se verificar qual é o valor estimado do fator de capacidade nas regiões, considerando como parâmetro de entrada para a distribuição de Weibull a velocidade média do vento em períodos de tempo, como representada nas figuras 28, 29 e 30. Ou seja, o fator de capacidade foi calculado em função das curvas características dos aerogeradores já utilizados em cada região nos parques eólicos instalados, e também através da estimativa de velocidade de vento.

### 5.3.1 Região de Camocim

O fator de capacidade na região da UE de Praia Formosa, figura 32, foi obtido considerando o mesmo método do item anterior, utilizando os dados de entrada para a velocidade média do vento, e a energia estimada através da distribuição de Weibull. Com isso determinou-se a curva da densidade de potência média obtida para a área de prospecção que é dada pela figura 31.

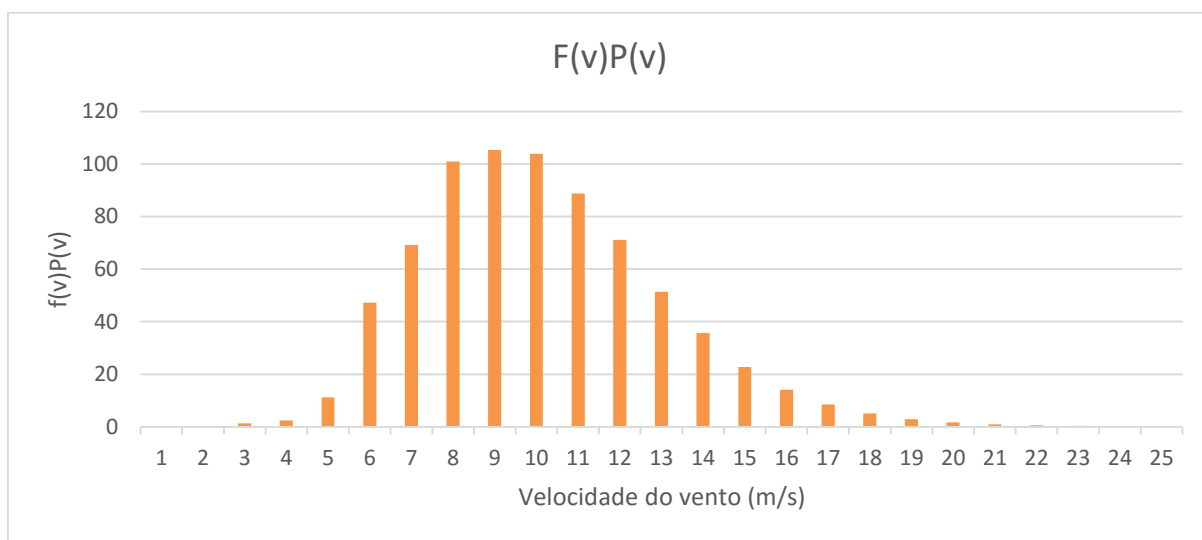


Figura 31:  $F(v)P(v)$  médio na região de Camocim.

O fator de capacidade é a relação entre a potência instalada e a potência fornecida pelo sistema, se considerarmos a máquina utilizada para o estudo, de potência nominal de 2,1 MW durante o período de um ano, o fator de capacidade médio anual na área é de cerca de 35%, isso através da análise da densidade de potência média na região, figura 31, e a estimativa de energia gerada. O mesmo raciocínio foi aplicado para a elaboração do mapa do fator de capacidade considerando os dados de velocidades médias do vento de acordo com a figura 32.

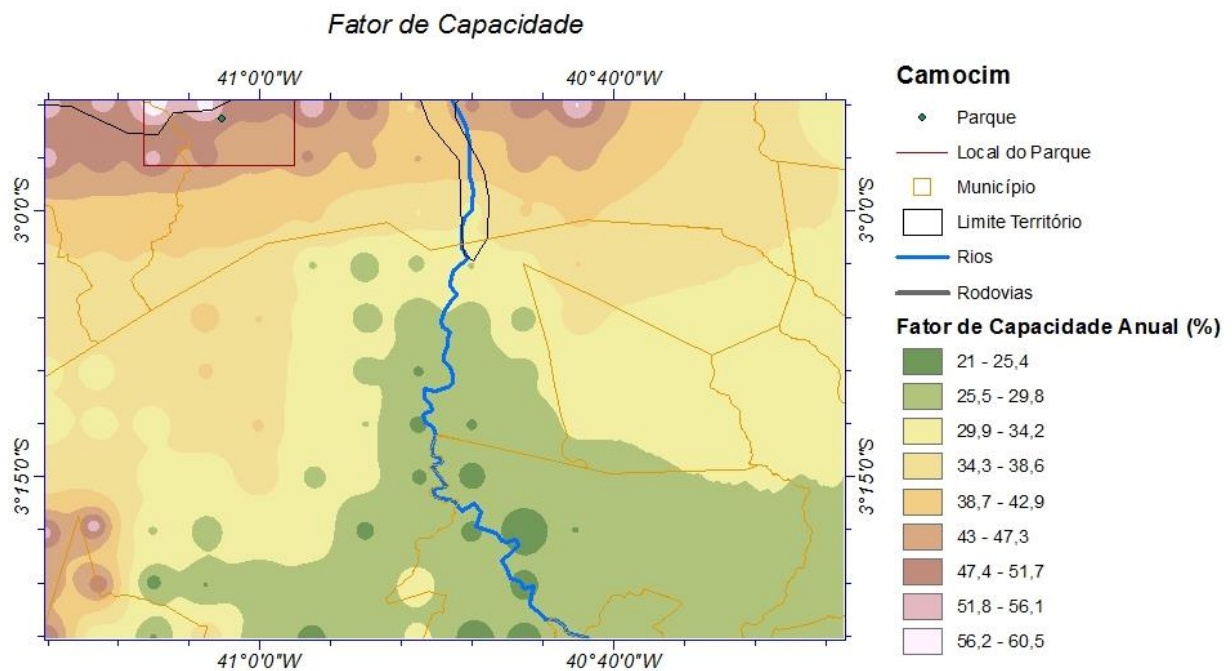


Figura 32: Fator de capacidade anual na região de Camocim.

Com o resultado obtido da prospecção através da aplicação de Weibull, busca-se verificar se esses dados são satisfatórios e, para isso é necessário que um dado seguro seja utilizado como parâmetro de comparação. Assim, utilizou-se o valor do fator de capacidade médio disponibilizado pelo parque instalado na região durante o projeto, como parâmetro de comparação com os dados obtidos nessa mesma área. Segundo a ONS (Operador Nacional do Sistema elétrico) esse valor é de 39,99%. O mapeamento do potencial eólico na região indica que o fator de capacidade prospectado para a mesma região é de aproximadamente 45%. Outras áreas da prospecção apontam que existem pontos de alta capacidade de geração de energia. O mapeamento do potencial eólico na região e o levantamento do fator de capacidade também foram estimados para as estações do ano e, mapas foram elaborados com a finalidade de auxiliar a identificação dessas áreas, figuras 33, 34, 35 e 36.

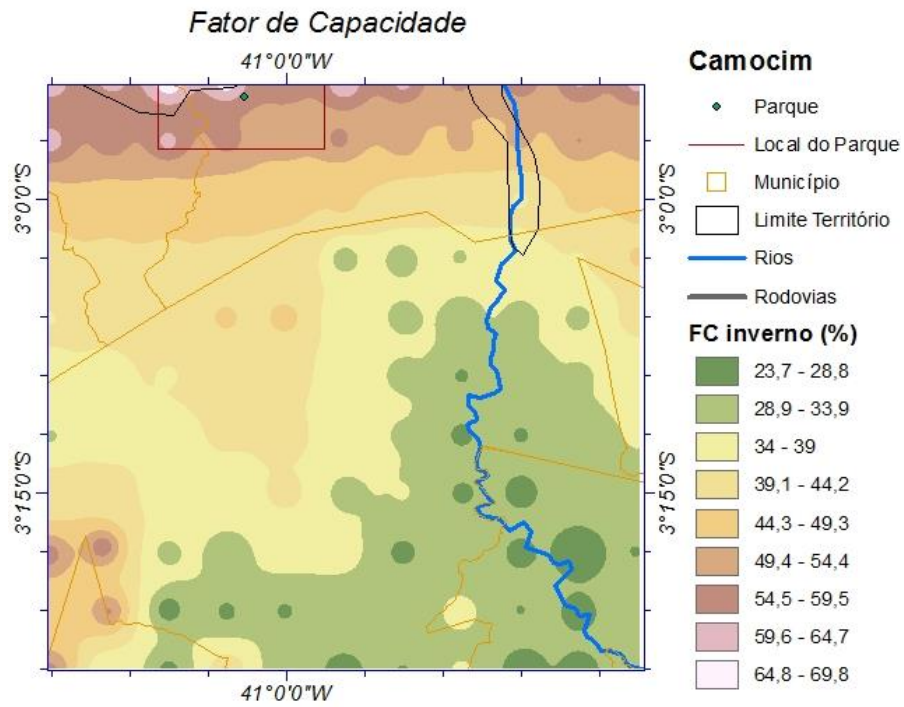


Figura 33: FC no inverno na região de Camocim.

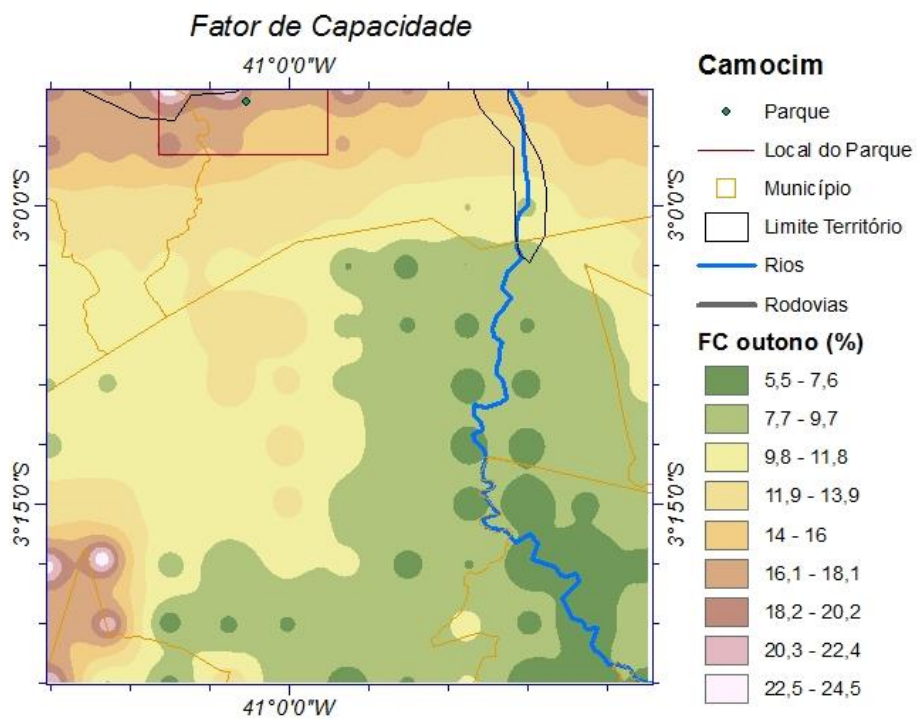


Figura 34: FC no outono para a região de Camocim.



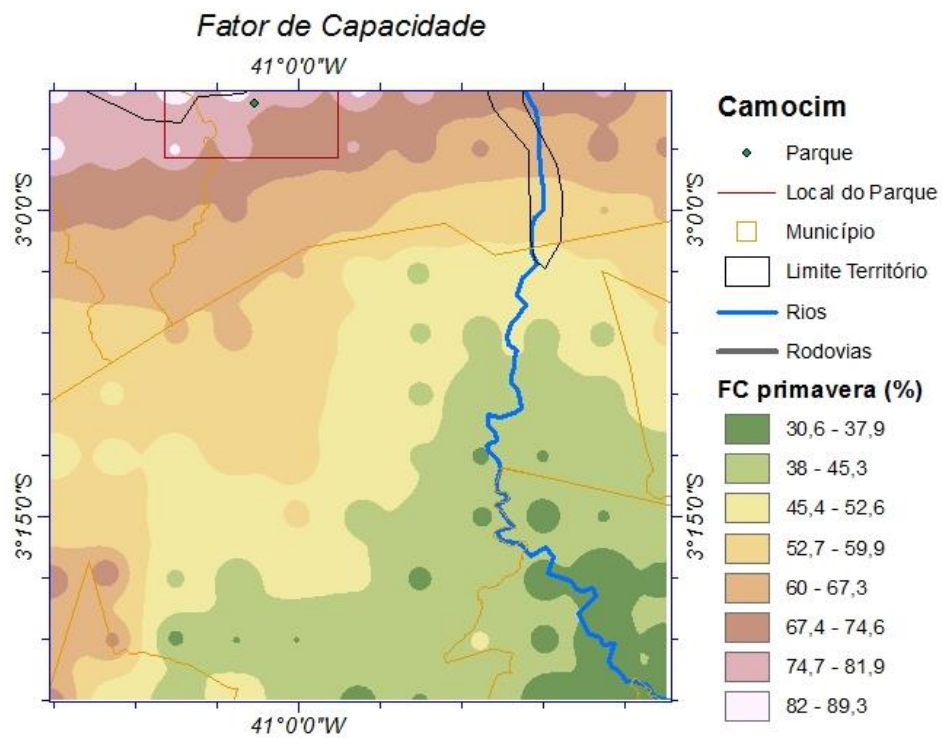


Figura 35: FC na primavera a região de Camocim.

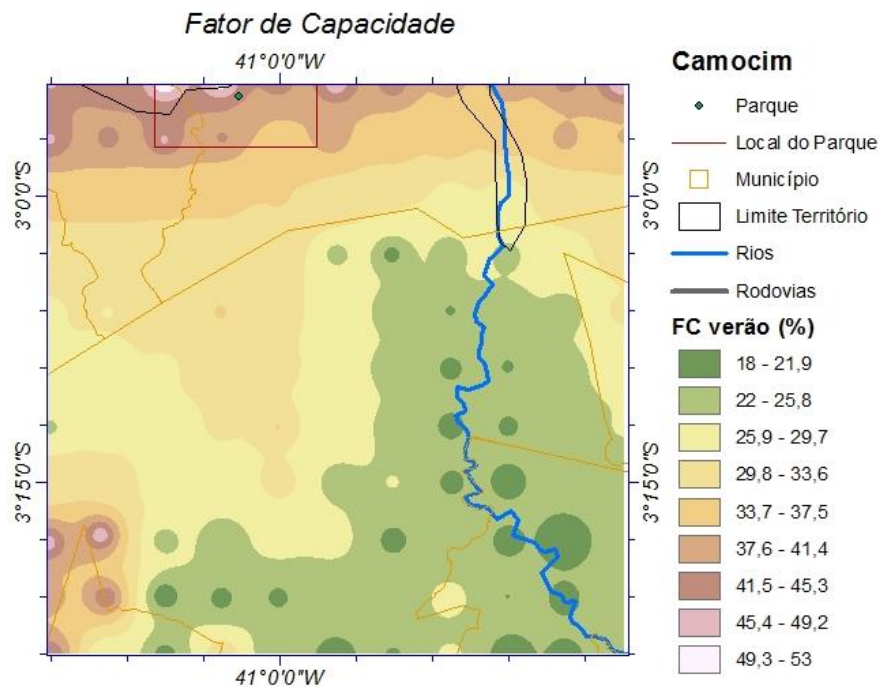


Figura 36: FC no verão na região de Camocim.

As informações dos mapas anteriores mostram que a melhor época do ano para o aproveitamento energético na região é na primavera e a pior época do ano é o outono.

### 5.3.2 Região de Beberibe

O fator de capacidade na região da Central Eólica de Beberibe foi obtido considerando os dados de entrada para a velocidade média do vento, e a energia estimada através da distribuição de Weibull. A Curva da densidade de potência média obtida para a área de prospecção é dada pela figura 37.

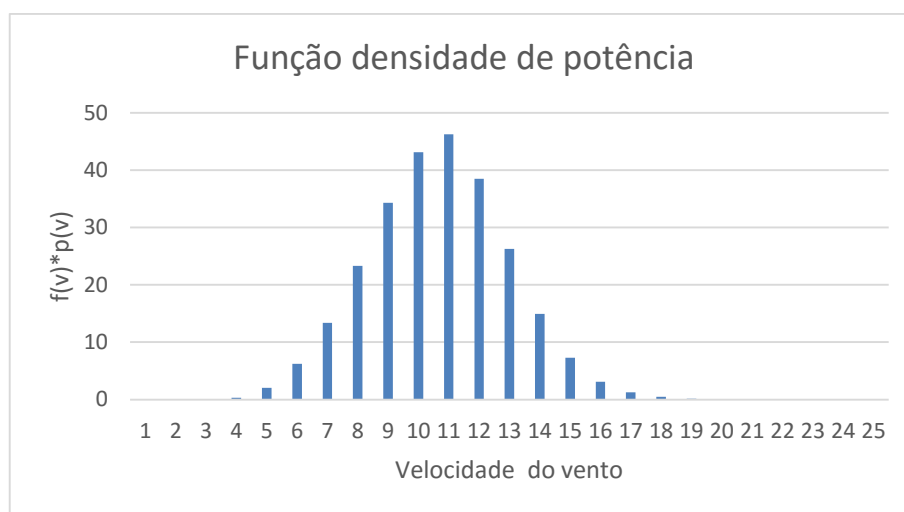


Figura 37:  $F(v)P(v)$  média da região.

O mesmo raciocínio foi aplicado para a elaboração do mapa do fator de capacidade da região, considerando os dados de velocidades médias do vento de acordo com a figura 34. Para a melhor representação dos dados utilizou-se a ferramenta presente no *ArcGis*, para criar uma superfície referente aos resultados obtidos para o fator de capacidade. Os dados obtidos para esse método são apresentados na figura 38.

Aplicando a equação 18 do capítulo 4, encontra-se o fator de capacidade, que é a relação entre a potência instalada e a potência fornecida pelo sistema. Se considerarmos a máquina utilizada para o estudo, de potência nominal de 800 kW, durante o período de um ano o fator de capacidade médio anual na área total é de cerca de 30 %.

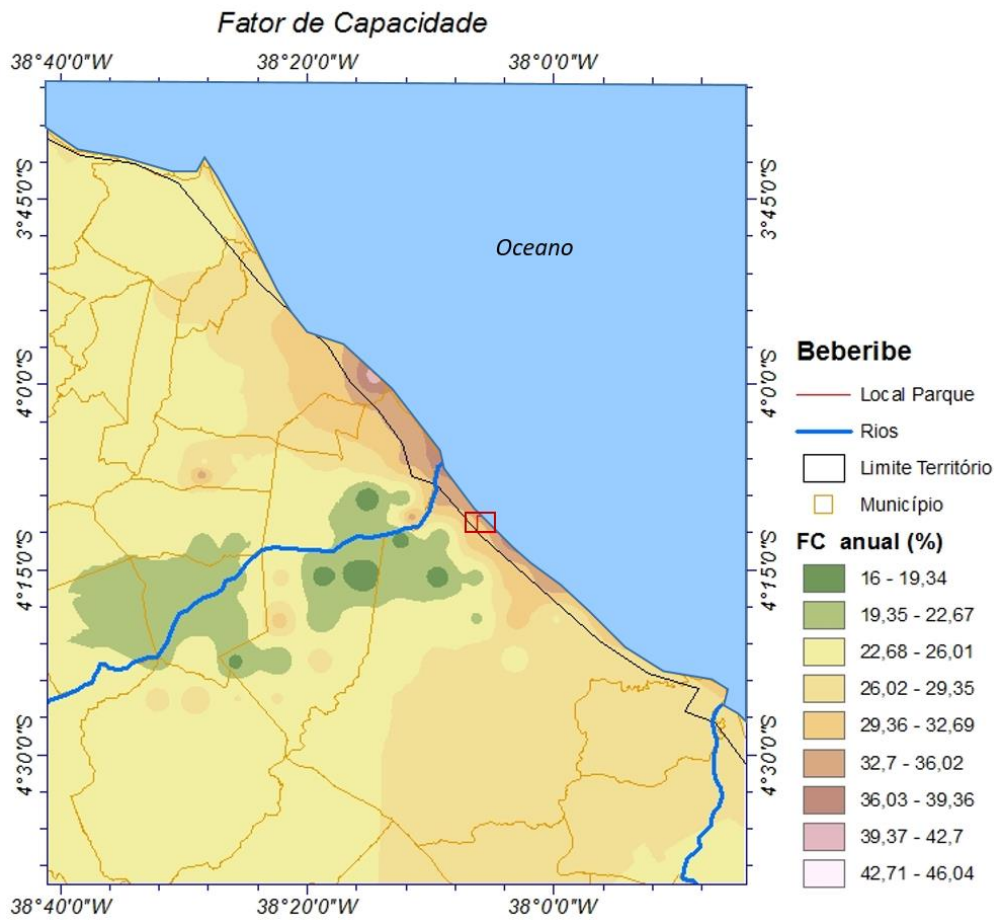


Figura 38: Fator de capacidade anual na região.

Considerando o resultado obtido da prospecção, busca-se verificar se esses dados são satisfatórios e, para isso é necessário a utilização de informações seguras como parâmetro de comparação. Assim, foi utilizado o valor do fator de capacidade médio disponibilizado pelo parque instalado na região, como parâmetro de comparação com os dados obtidos na mesma região, durante o processo de prospecção apresentado nesse trabalho, figura 39.



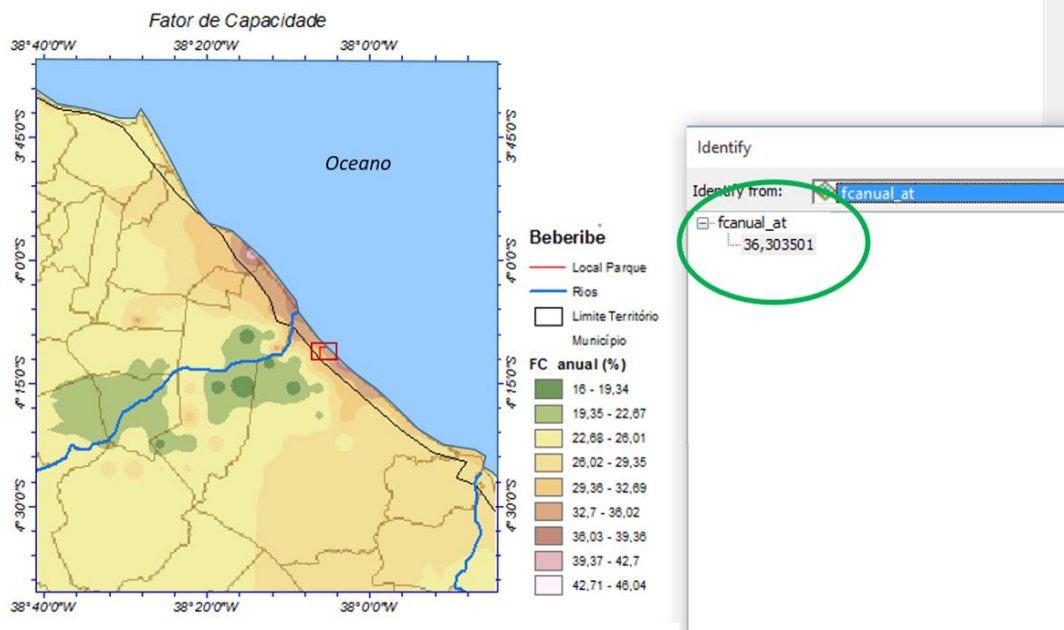


Figura 39: Fator de capacidade anual médio na região do parque eólico instalado.

O resultado da prospecção indica que no local onde o parque está instalado o fator de capacidade é de aproximadamente 37%. Já no documento do Anexo B, indica que o fator de capacidade médio de operação do parque eólico de Beberibe é menor, sendo de aproximadamente 31,88%. Com a finalidade de analisar o fator de capacidade também para as estações do ano, mapas foram elaborados e estão apresentados nas figuras 40, 41, 42 e 43.

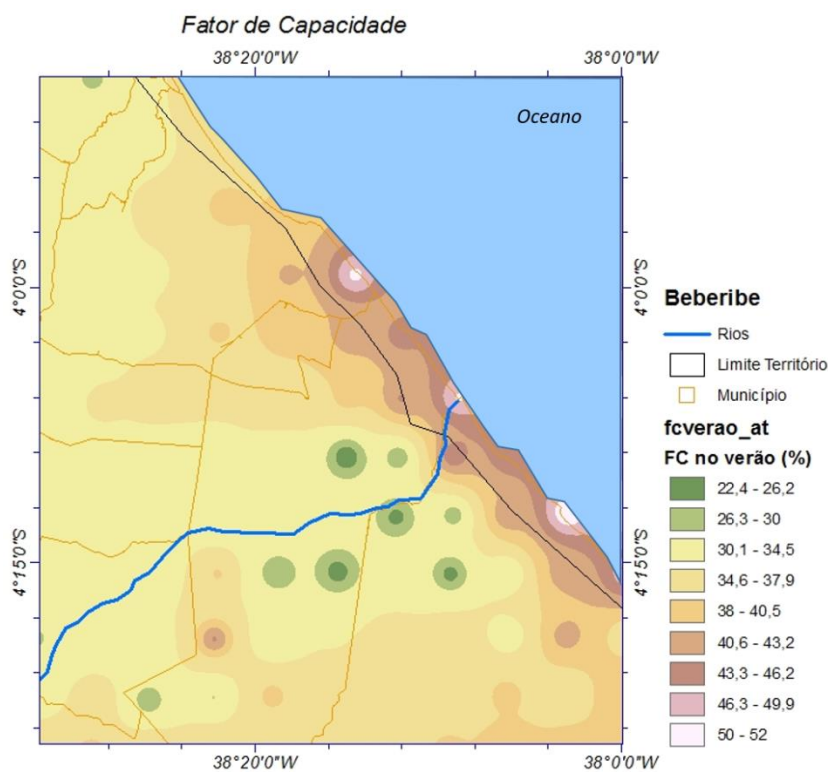


Figura 40: FC no verão na região de Beberibe.

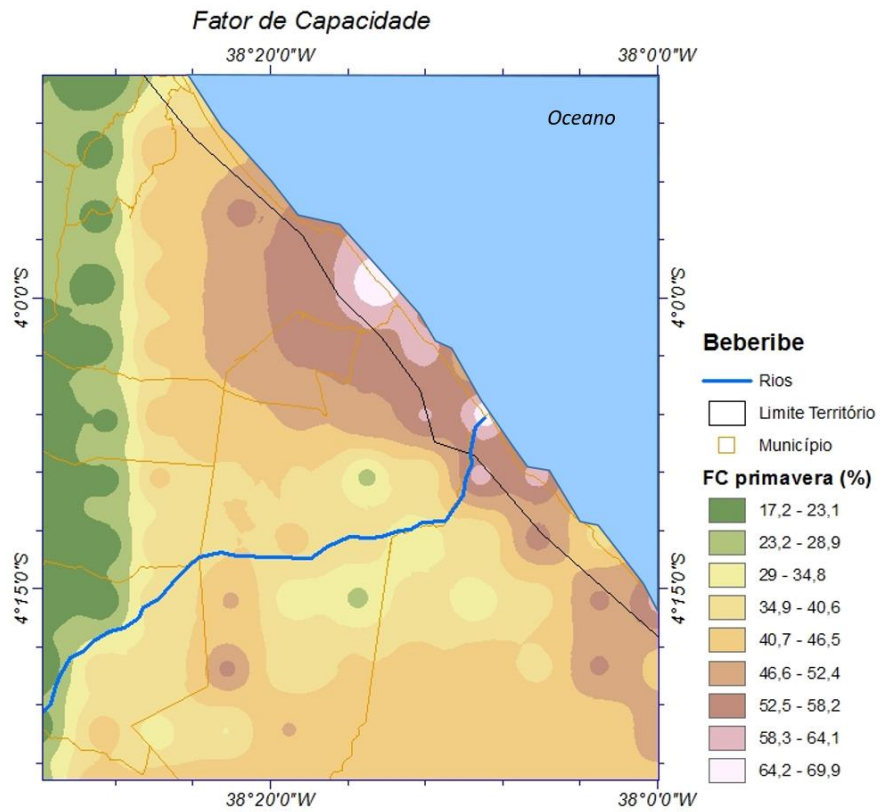


Figura 41: FC na primavera na região de Beberibe.

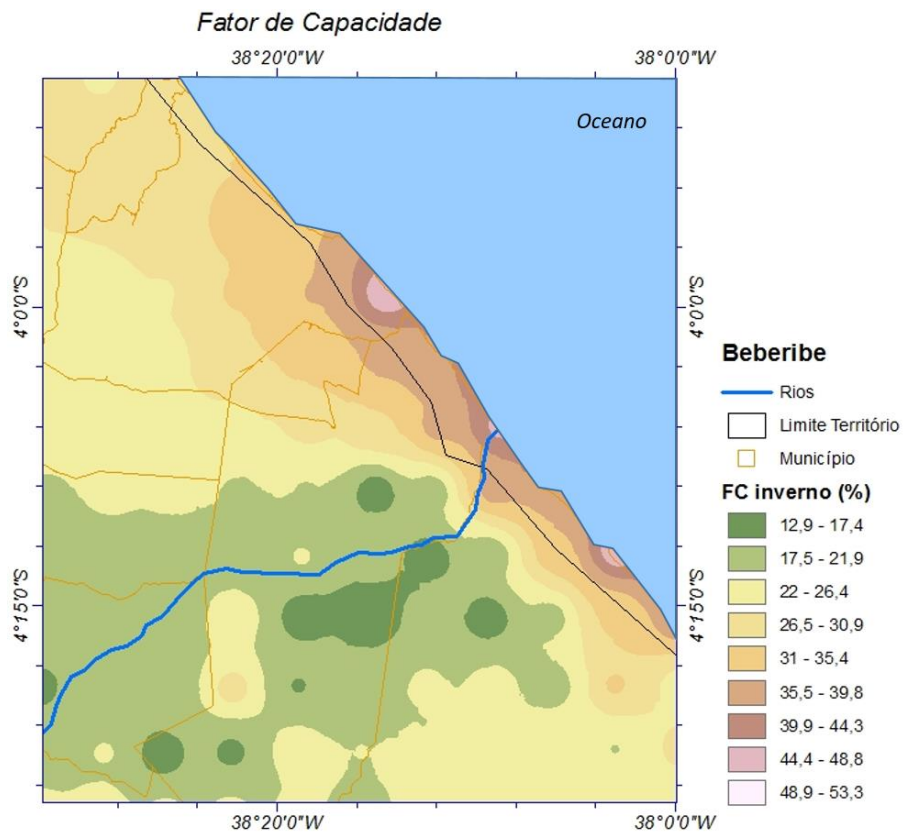
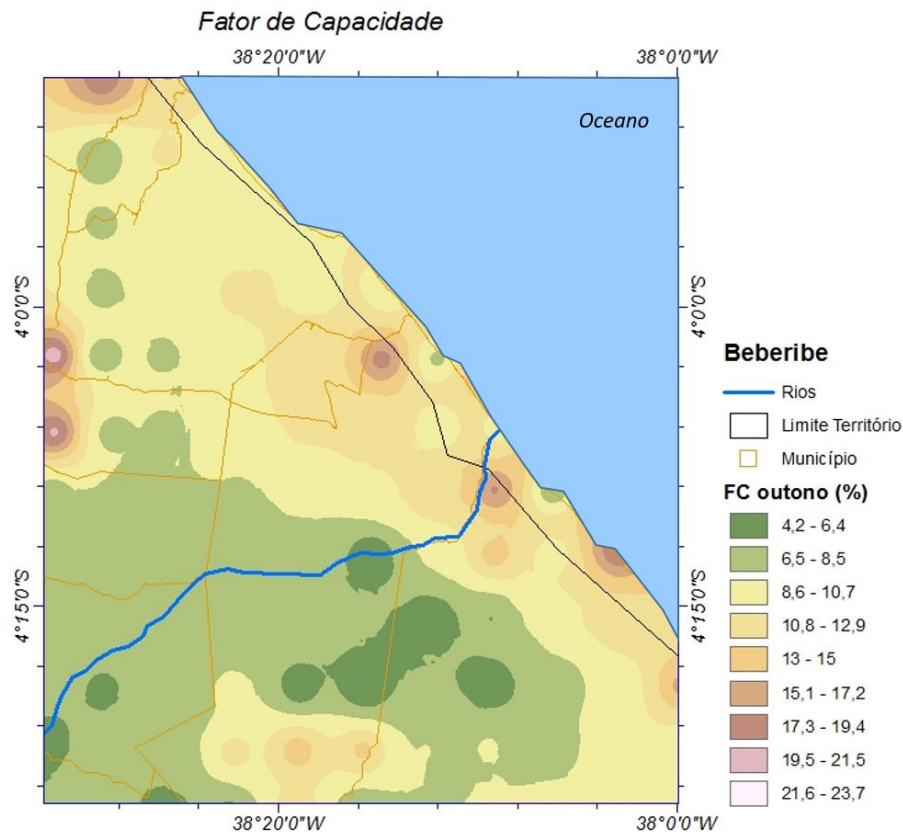


Figura 42: FC no inverno na região de Beberibe.



*Figura 43: FC no outono na região de Beberibe.*

As informações dos mapas anteriores mostram que a melhor época do ano para o aproveitamento energético na região é na primavera e, a pior época do ano é o outono. Isso ocorre devido ao comportamento do clima em razão da incidência solar sobre a superfície terrestre e, que muda a formação dos ventos e sua intensidade, como apresentado nas características dos ventos no Nordeste que estão no capítulo 2. Também mostra que no resultado do perfil da distribuição se comparado ao mapa eólico do Brasil, existirá áreas de bom aproveitamento do vento e com períodos favoráveis para a geração de energia, sendo a melhor época entre agosto e novembro.

### 5.3.3 Região de Paracuru

O fator de capacidade na região de Paracuru foi obtido considerando o mesmo método dos itens anteriores, utilizando os dados de entrada para as velocidades médias do vento das séries das estações meteorológicas e do atlas, que permitiu o cálculo da energia estimada através da distribuição de Weibull. Desta forma, a curva de densidade de potência pode ser traçada com a finalidade de auxiliar a obtenção do FC, e pode ser vista na figura 44.

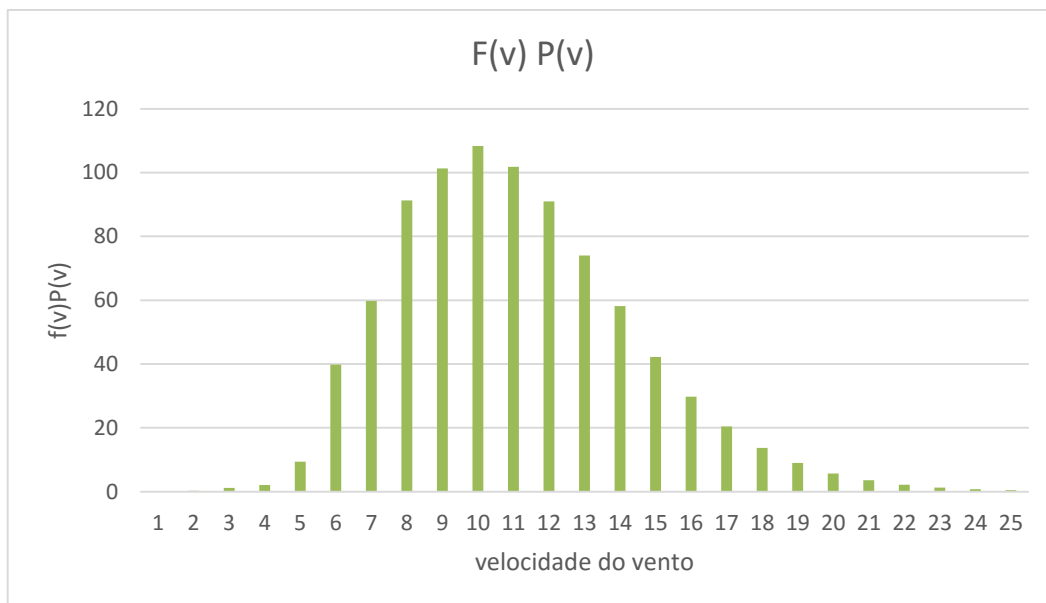


Figura 44: Densidade de potência média para a região de Paracuru.

Fazendo a somatória dos valores do gráfico anterior e considerando o período de análise de um ano para a região, cujo a máquina instalada é de 2,1 MW, tem-se que o fator de capacidade médio da região é de aproximadamente 40%, figura 44. Novamente com a finalidade de verificar os dados prospectados, utilizou-se como ferramenta a comparação de um ponto do resultado de prospecção, com um valor real para o mesmo ponto. Ou seja, na região de Paracuru existe o parque eólico de Paracuru, em operação e de acordo com a CPFL o registro é de que o FC é de cerca de 38,8%. A prospecção do potencial eólico na região indicou que no ponto escolhido para comparação entre o dado teórico e o dado real, nesse caso o utilizado é o local onde o parque de Paracuru está localizado, o fator de capacidade é superior apresentando médias próximas a 44%, figura 45.

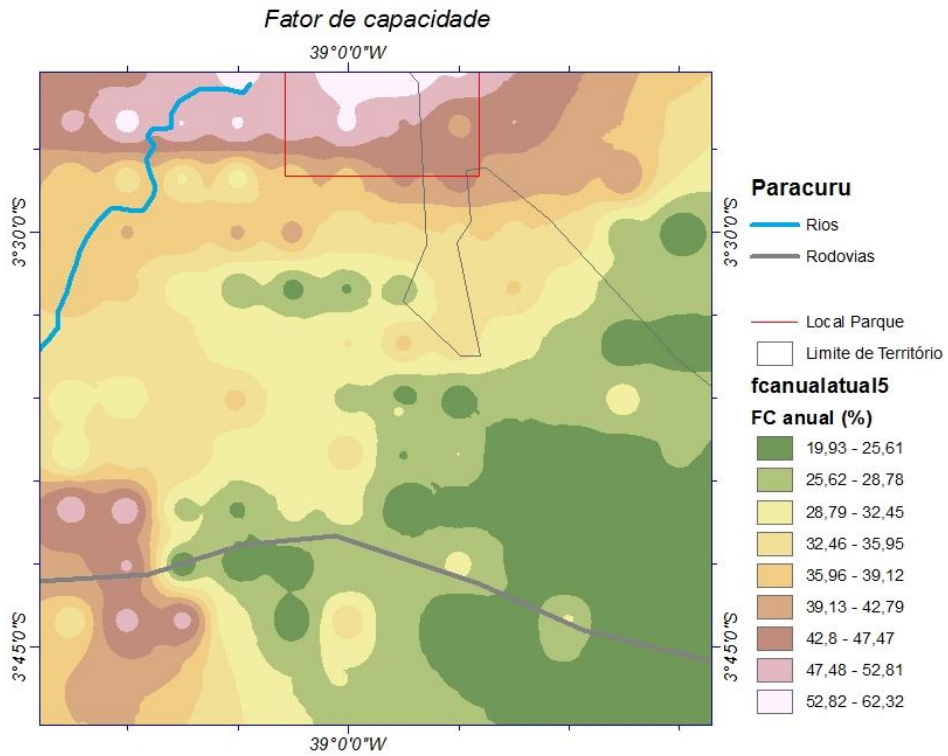


Figura 45: FC anual na região de Paracuru.

Com a finalidade de utilizar o método de prospecção para o levantamento do potencial eólico, foram elaborados mapas também do fator de capacidade na região para as estações do ano, figuras 46, 47, 48 e 49.

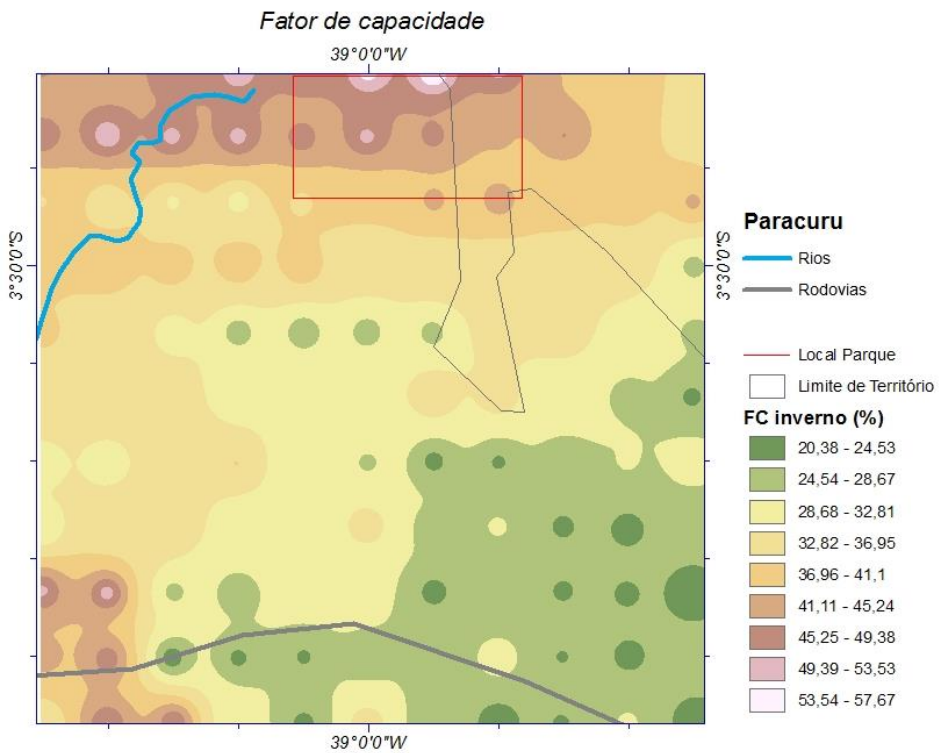


Figura 46: FC no inverno na região de Paracuru.



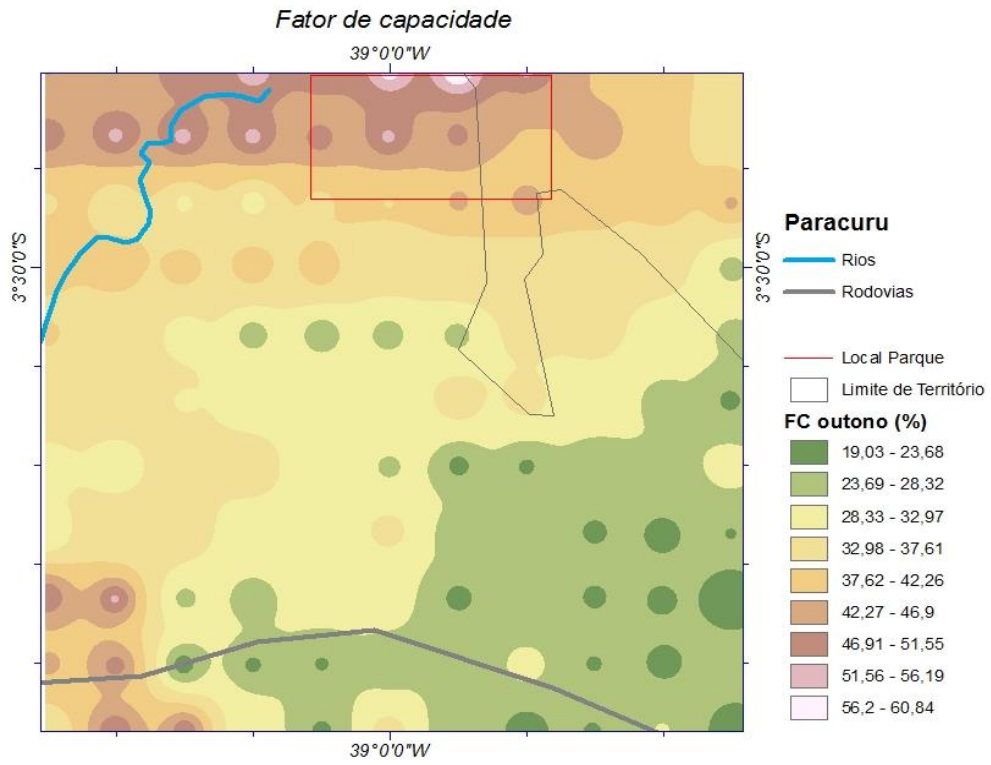


Figura 47: FC no outono na região de Paracuru.

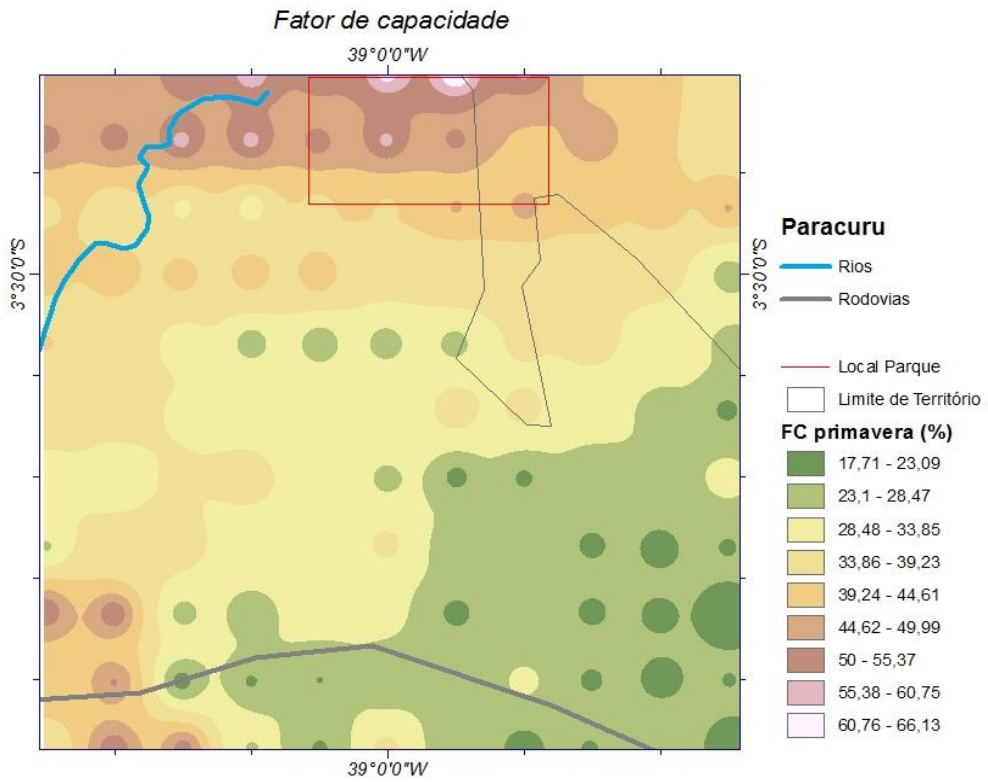


Figura 48: FC na primavera na região de Paracuru.

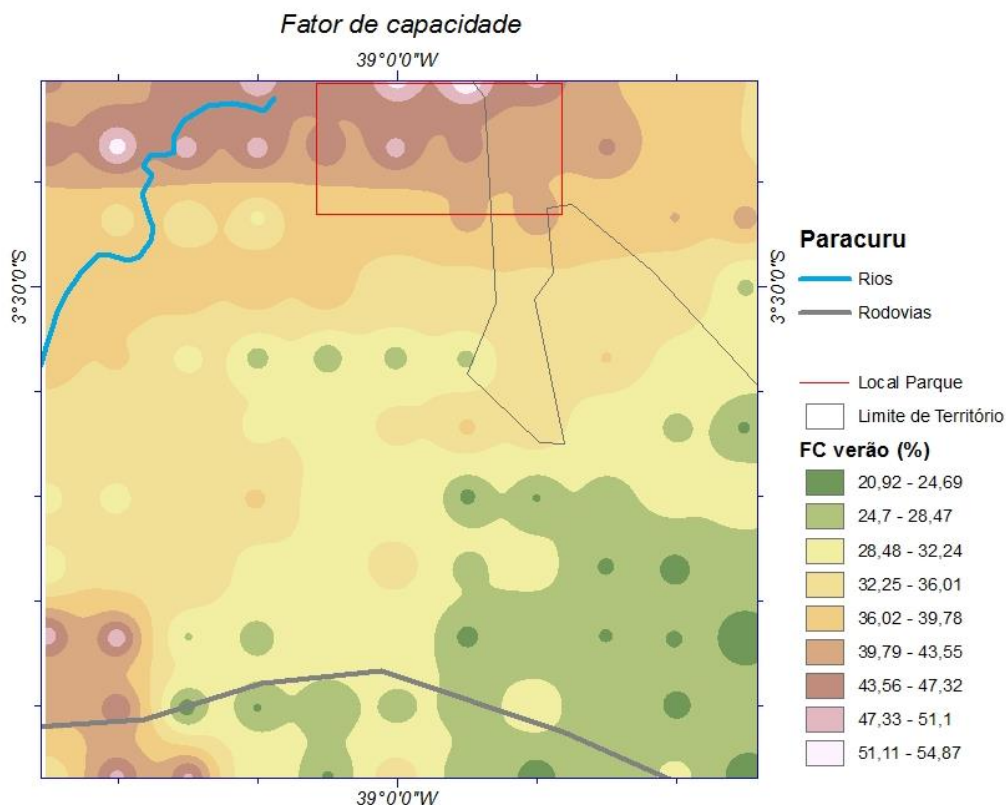


Figura 49: FC no verão na região de Paracuru.

As informações dos mapas anteriores mostram que a melhor época do ano para o aproveitamento energético na região é na primavera e a pior época do ano é o outono.

#### **5.4 Cálculo do erro relativo entre os dados: Comparando os resultados da prospecção e dos registros dos parques eólicos.**

Para verificar se a prospecção do potencial eólico realizada, utilizando como dados de entrada as informações dos bancos de dados descritos neste trabalho, apresenta valores coerentes, fez-se durante o estudo a comparação dos resultados do método com algum ponto que exista disponível o valor de velocidade do vento e do fator de capacidade e, que sejam considerados dados seguros. Esses dados de referências para a comparação são: os de parques eólicos em operação dentro da área utilizada para aplicação do procedimento de prospecção do potencial e, os dados obtidos como resultado do procedimento.

Os resultados do procedimento são valores que passaram pela aplicação da lei da Potência para a extrapolação, posteriormente pela distribuição de Weibull e pelo modelo indicado para interpolação desses dados. O principal parâmetro utilizado para a comparação é o Fator de Capacidade, por ser o índice de relação entre a energia gerada e a capacidade de geração de energia em uma área, isso em função da disponibilidade do vento, ou em função da capacidade de um aerogerador gerar energia (Custódio, 2009).

Para essa verificação utilizou-se o cálculo do erro relativo para esses dados, fornecido pela equação (21).

$$Erro_{relatovo} = \frac{|Dado_{amostral} - Dado_{referência}|}{Dado_{referência}} \quad (21)$$

Onde:

- Dado amostral é em relação aos valores obtidos na prospecção do potencial.
- Dado de referência é em relação ao dado real utilizado como parâmetro de comparação.

Calculando o erro relativo entre as velocidades de vento extrapoladas pelo modelo da lei da potência, os valores são os da Tabela 4.

Tabela 4: Cálculo do Erro relativo entre as velocidades do vento:

<b>Região</b>	<b>vel.(extrapolada)(m/s)</b>	<b>vel. (referencia)(m/s)</b>	<b>Erro relativo</b>
<i>Parque eólico Paracuru</i>	8,23	7,36	0,12
<i>Central Eólica Beberibe</i>	9,33	8,50	0,10
<i>Usina eólica em Camocim</i>	8,04	7,07	0,14

E fazendo a mesma comparação para o fator de capacidade tem-se o erro relativo de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5: Cálculo do erro relativo para os valores de Fator de Capacidade.

<b>Região</b>	<b>FC prospectado (%)</b>	<b>FC registrado (%)</b>	<b>Erro relativo</b>
<i>Parque eólico Paracuru</i>	44,09	38,80	0,14
<i>Central Eólica Beberibe</i>	36,30	31,88	0,13
<i>Usina eólica em Camocim</i>	46,10	39,99	0,15



Os valores nos quadros anteriores indicam que a extrapolação da velocidade do vento combinada a interpolação desses dados, apresentará desvio, e assim terá um acréscimo no valor da velocidade resultante. Já o fator de capacidade, também apresenta um desvio em relação aos dados dos pontos amostrais, utilizados para a comparação com os dados reais da área dos parques.

Foram analisados dados pontuais para os locais onde existem os parques eólicos em operação, para verificar se a interpolação entre mais dados para a determinação do fator de capacidade e o potencial eólico é uma boa ferramenta auxiliar de prospecção (Tabela 6).

*Tabela 6: Fator de Capacidade para um único ponto no local próximo a localização dos parques eólicos em operação.*

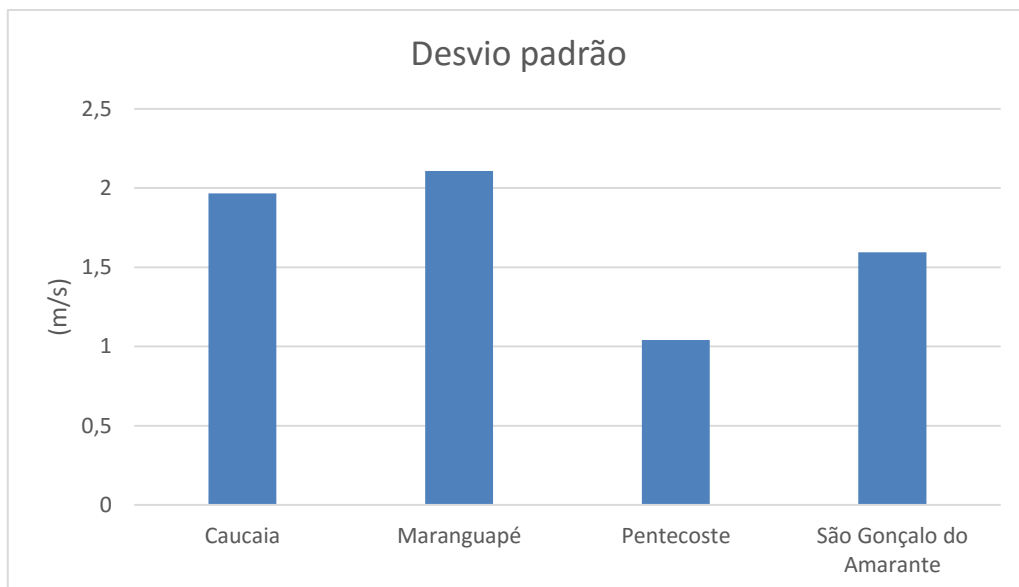
<b>Região</b>	<b>FC</b>
<b>Paracuru</b>	0.40
<b>Beberibe</b>	0.34
<b>Camocim</b>	0.43

O desvio dessas informações em relação ao dado de referência são números próximos por serem valores semelhantes, e podem ser ocasionados por outros motivos. Ainda, como forma de complementar a análise calculou-se o desvio padrão referente as séries de velocidades do vento coletadas nas estações meteorológicas, para serem utilizadas como dados de entrada para o estudo.

O desvio padrão dos dados foi calculado através da equação (22):

$$\sigma = \sqrt{\frac{((x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_n - \bar{x})^2)}{n - 1}} \quad \therefore \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (22)$$

Por exemplo, para o estudo de caso da região de Camocim, onde está localizado o Parque Eólico de Paracuru, as estações apresentam desvios padrões que podem ser verificados na figura 59.



*Figura 50: Desvio Padrão dos dados das estações utilizadas na prospecção de Paracuru.*

Da mesma forma que ocorreram esses desvios para o estudo em Paracuru aconteceram com os dados das outras regiões. Além disso, os ajustes dos dados do atlas também podem apresentar um erro, devido a variação dos parâmetros em função das alturas e da função Gama, e também por serem resultantes de um modelo inicial aplicado.

## **6. Análises e conclusões dos resultados**

O trabalho apresentado buscou aplicar um modelo de prospecção de potencial eólico, utilizando como ferramenta estatística a distribuição de Weibull, combinada a extrapolação vertical do vento em um modelo de interpolação de dados, com a finalidade de criar um resultado visual sobre a potencialidade do vento em gerar energia, em três regiões de estudo. Além disso, apresenta algumas considerações sobre o uso correto da avaliação do vento para a finalidade de gerar eletricidade. A metodologia é uma alternativa acadêmica para contribuir com a expansão da energia eólica no Brasil e por isso é importante que ela seja adequada ao local de aplicação do estudo.

De acordo com os resultados do estudo, que utilizou séries históricas e dados do atlas como informações iniciais do vento para a prospecção, pode-se determinar o fator de capacidade para as 3 regiões de análises, além de permitir estimar a velocidade do vento para as alturas de extrapolação desejadas. Concluiu-se, que as séries históricas originadas das estações do SINDA, quando utilizadas implicam em erros, que não poderão ser descartados facilmente e que serão inseridos como dados de entrada para o processo de prospecção, isso porque existem possíveis falhas que podem ocorrer nos anemômetros para a medição da velocidade do vento, e que não estão explícitas nas informações obtidas. Esses erros podem estar relacionados a mal utilização do equipamento, falhas humanas, interferências técnicas, conteúdo reduzido de informações sobre as medições do vento e má qualidade das estações utilizadas nas regiões. Observa-se que a metodologia combinada a interpolação dos dados pode ser utilizada para auxiliar análises iniciais de regiões onde pretende-se explorar o vento, porém com a ressalva de que a qualidade dos dados podem interferir nos resultados.

Considerando os dados das séries que foram utilizados, pode-se verificar que existe a possibilidade de ocorrência de um desvio entre essas informações. Como os cálculos dos parâmetros de Weibull são dependentes da velocidade do vento, pode ser que a utilização desses dados interfira na modelagem da distribuição. Além disso, para a utilização da prospecção do potencial eólico utilizou-se como entrada os dados do atlas eólico, que são disponibilizados pelo Cresesb, o que também podem ocasionar incertezas sobre os valores de resultados da metodologia, isso porque essas informações também são resultantes de um modelo matemático.

No Apêndice A, desse trabalho apresenta-se a metodologia aplicada a um ponto específico na região de cada área de estudo e, próximo ao local onde os parques eólicos estão em operação, com a finalidade de exemplificar como a distribuição do vento possibilita o cálculo da energia estimada e do fator de capacidade. Se considerarmos que na região para um

único ponto amostral a velocidade do vento e os fatores  $k$  e  $c$  são constantes, tem-se que a região do parque eólico de Beberibe terá uma energia média anual prospectada de 76 GWh, e se comparada ao valor médio registrado e estimado de geração pelo parque de acordo com o Anexo B, a energia é de 71,4 GWh, assim a prospecção indica que o valor da EAG é cerca de 10% maior. Essa diferença pode ser ocasionada devido aos dados de velocidades do vento registrados e os dados de entrada do estudo.

Verificando esses números citados anteriormente e os resultados do estudo, pode-se concluir que o comportamento da distribuição de Weibull mesmo que submetida a diferentes condições de modelagem para fins de aproveitamento energético, se mostra uma alternativa de estudo de prospecção, e pode-se observar que:

- No Nordeste a faixa de ajuste adequada para as condições de vento deve levar em conta que existe maior número de ocorrência nos valores mais próximos ao da mediana da distribuição (Silva, 2003), o que pode ter elevado o valor final do fator de capacidade.
- Considera-se que uma distribuição estatística bem ajustada ao perfil de vento, é aquela que apresenta o histograma de densidade de potência próximo à curva de distribuição do vento, e nesse caso observa-se pelos pontos analisados no Apêndice A, que para a região de estudo a distribuição se adaptou bem.
- Como as médias do parâmetro  $k$  no Nordeste do Brasil são altas ao longo dos períodos do ano e por apresentarem variações, fica implícito na distribuição que existirá incertezas relacionadas a determinação dos parâmetros.
- A qualidade dos dados de entrada pode interferir nos resultados obtidos, porém a metodologia pode ser utilizada como ferramenta inicial de verificação dos pontos de melhor potencial, mesmo que se utilizem dados não tão seguros, mas indicará os melhores pontos para a instalação de anemômetros e aferição da velocidade do vento para certificação.

Observa-se ainda que a aplicação da interpolação dos dados e a utilização de valores vindos das estações meteorológicas e do atlas permite a análise do fator de capacidade através de verificação visual nos mapas elaborados. Portanto, é possível concluir que a utilização desses bancos de informações sobre o vento, não são confiáveis e causam desvios nos valores resultantes, porém a ferramenta de interpolação, na prospecção do potencial eólico, pode auxiliar na determinação de áreas para a instalação de anemômetros para a validação da velocidade média do vento.

Como sugestão para aprimoramento de trabalhos futuros sugere-se a aplicação do estudo através de ferramentas que busquem minimizar erros que possam estar relacionados a

matemática da distribuição de Weibull. Para isso sugere-se o uso de software como o *WindPro*® ou por exemplo o *Windgrapher*®, utilizados para o cálculo da distribuição de Weibull e a estimativa da energia gerada. Para um estudo futuro seria válida a comparação entre os resultados dos dados prospectados através dessa metodologia e, dos resultados obtidos pelos *softwares*, com a finalidade de verificar se existirá redução no erro relativo entre a resposta do estudo e, o valor de referência, como nesse caso, os pontos onde existem valores garantidos de fator de capacidade e que estão localizados dentro das áreas dos estudos de casos.

## 7. Referências Bibliográficas

- ABEEÓLICA. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/2915-alemanha,-china-e-eua-instalam-28gw-e-%C3%B3licos-em-2014.html>>. Acesso em 10 de Agosto de 2015.
- ALBUQUERQUE, R.; RODRIGUES, A.; SILVA, M. G. “Cálculo de índices de confiabilidade em sistemas de geração de energia usando um algoritmo genético modificado”. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Grupo de Sistemas de Potência, Departamento de Engenharia da Eletricidade. Universidade Federal do Maranhão. 2011.
- ALÉ, J. A. V.; OLIVEIRA, C. P.; LOPES, A. G., “Caracterização eólica de microrregião utilizando torre meteorológica e ferramenta computacional”. 1o Seminário Nacional Sobre Engenharia do Vento – SENEV 2010. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2010.
- ALMEIDA J. A.; LOPES, T. M. F. " Análise de Dados da Velocidade do Vento e Potencial Eólico na Cidade do Rio Grande". Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, (CD-ROM). 2003.
- ALVES, E. D. L.; SILVA, S. T. “direção e velocidade do vento em uma floresta de transição Amazônia-cerrado no norte de Mato Grosso, Brasil”. 2011. B.goiano.geogr. Goiânia, v. 31, n. 1, p. 63-74. 2011.
- AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M. J.; ZACK, A. L. SÁ. Atlas do potencial eólico brasileiro. Brasília: CRESESB, 2001.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração (BIG). Brasília, 2013.
- ANEEL, 2012. Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2ª edição. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/6\\_2.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_2.htm)>. Acessado em 7 de outubro de 2015.
- ANEEL. Banco de Informações de Geração. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.>htm>. Acesso em: 20 de abril de 2015.
- ANJOS, M. W. B.; GOIS, D. V.; CRUZ, R.; LIMA, L. P. “Climatologia urbana e espaços verdes: contributo ao planejamento das cidades”. REVISTA GEONORTE, Edição Especial 2, V.2, N.5, p. 233 – 245, 2012.
- ARAÚJO, M.R.O.P. Estudo comparativo de sistemas eólicos utilizando modelos probabilísticos de velocidade do vento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1989.

ARAÚJO, A., “Fundamentos da Geração Eólica – Processos de Conversão e Tecnologia”. UFPE, 2011.

AZEVEDO, D. C. R. “Métodos heurísticos aplicados no ajuste de curvas de Weibull em energia eólica”. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica. Universidade Federal do Ceará. 2015. 127p.

BBC. Disponível em: [http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/01/140108\\_china\\_eolica\\_mdb](http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/01/140108_china_eolica_mdb) Acesso em 10 de agosto de 2015.

BIG Banco de Informações de Geração, ANEEL. Atualizado em: 21/01/2015. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=7&ger=Combustivel&principal=E%F3lica>

BOTTON, M.; HICKEL, E.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.; “Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas”. Guaíba: Agropecuária, 2002.

CAMELO, H. N.; MARIA, P. H. S.; CARVALHO, P. C. M.; PEREIRA, T. B. “Métodos de Extrapolação de Velocidade do Vento para Regiões Litorâneas do Nordeste Brasileiro”. CBMET. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI. 2010.

CARBON TRUST. Disponível em: < [http://www.carbontrust.com/media/77248/ctc738\\_small-scale\\_wind\\_energy.pdf](http://www.carbontrust.com/media/77248/ctc738_small-scale_wind_energy.pdf). > Acesso em: 16 de novembro de 2015.

CARNEIRO, J.” Energia Eólica”. Material de estudo da disciplina de licenciatura em Ciência do Ambiente.

CASTRO, R. M. C. Introdução à Energia Eólica. Portugal, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2005. 83p.

CENÁRIO ENERGIA EÓLICA. Disponível em: <http://brasilenergia.editorabrasilenergia.com/cenarios/eol-2014/flip/index.html#/9/zoomed>. Acessado em: 20 de setembro de 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA (CRESESB). Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/eolica/apstenergiiaeolica.htm>. Acesso em 18 de novembro de 2015.

CEPEL. Disponível em: <[www.cepel.br](http://www.cepel.br)>. Acessado em 4 de abril de 2015.

- CHOU S. C.; CHAGAS D. J.; PAIVA NETO A. C.; VENTURA G. M.; LYRA A. A.; PEREIRA E.B.; Regime Eólico de Quatro Estações no Nordeste – Congresso Brasileiro de Meteorologia. CBMET Edição XIV – Florianópolis. 2006.
- COELHO, C. I. A. “Avaliação dos Impactes Ambientais dos Parques Eólicos em Áreas Protegidas: O Caso de Estudo do Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros”. Dissertação de mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente. Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2007.
- COUTINHO, F. J. A. “Aspectos analíticos no estudo de impactos gerados por ruídos e estruturas de aerogeradores”. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual do Ceará. 2012
- CUNHA, Jr. I. C., ALMEIDA, J.A. “Análise do desempenho de um aerogerador de pequeno porte”, FURG. 2006.
- CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. Aspectos econômicos da energia eólica. In: CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos, Energia eólica para produção de energia elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.
- DIONISIO, F.; SILVA, L. A.; CLAUDINO, L.; BERNARDES, M.; VACARI, R.; ROSSI, T. CRESEB “Geração de energia elétrica a partir de energia eólica”. CEPEL. 2013
- DURISIC, Z; MIKULOVI, J. “A model for vertical wind speed data extrapolation for improving Wind resource assessment using WAsP”. Renewable Energy. Revista Elsevier. 2011.
- DUTRA, R. M. “viabilidade técnico-econômica da energia eólica: Face ao novo marco regulatório do setor Elétrico brasileiro”. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energetico. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2001. 272p.
- DUTRA, Ricardo Marques. Propostas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA. Rio de Janeiro 4 de abril de 2007.
- DUTRA, R. “Energia Eólica – Princípios e Tecnologias”. CRESEB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- ELAMOURI, M.; AMAR, F. A.; TRABELSI, A. “Vertical characterization of the wind mode and its effect on the wind farm profitability of Sidi Daoud –Tunísia”. Energy Conversion and Management. Revista Elsevier. 2010.
- ENERCON. ENERCON Wind Turbines – Product Overview. Disponível em: <[http://www.enercon.de/en/\\_home.htm](http://www.enercon.de/en/_home.htm)>. Acessado em: 10 de maio de 2015.



- FEITOSA, E.A.N., ROHATGI, J.S., LOBORIO, E. The Influence of High Weibull Shape Factor on the Design of Wind Turbines. In: Wind Energy. Houston – USA, ASME, 1993.
- FERRAZ, A. P. C., “Avaliação de operação de geradores eólicos em regime estacionário considerando a conexão direta à rede elétrica”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.
- FERREIRA AZEVEDO, A. A. “Sistema de produção de energia eólica”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. 2011. 191p.
- FERREIRA, E. T. “Estudo comparativo entre a velocidade básica do vento estabelecida na NBR. 6123 e a obtida de estações meteorológicas na Paraíba- Impactos nos âmbitos do projeto estrutural, do meio ambiente e dos custos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba. 2005. 131p.
- FRANK, H. P. et al. The numerical wind atlas. RISØ, 2001.
- GABRIEL FILHO, L.R.A.; SERAPHIM, O.J.; CREMASCO, C.P.; CANEPPELE, F. de L. “Metodologia da determinação dos parâmetros característicos de sistemas eólicos de geração de energia. Revista Tecnologia”. Canoas. 2008. v.9, 1527 p.
- GARCIA, A.; TORRES, J. L.; PRIETO, E.; & FRANCISCO, A. “Fitting Wind Speed Distributions: A Case Study”. Solar Energy, v. 6, n. 2, p. 139-144, 1998.
- GLOBO NATUREZA. Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2013/01/euaregistrannovorecordedeageracaodeenergiaeolicaem2012.html>> Acessado em: 23 de setembro de 2015.
- GUALTIERI, G; SECCI, S. “Methods to extrapolate wind resource to the turbine hub height based on power law: A 1-h wind speed vs. Weibull distribution extrapolation comparison”. Renewable Energy. Revista Elsevier. 2012.
- HAAS, R.; SAKAGAMI, Y.; SAUTHIER, L. C.; SANTOS, P. A. A.; TAVES, F. F.; PASSOS, J. C.; MACHUCA, M. N.; CARDOSO, B. J.; PEROSA, B. “Influência de Fenômenos Climáticos no Desempenho de dois Parques Eólicos”. Trabalho desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL. 2013.
- HERP, J., POULSEN, U. V., GREINER, M. “Wind farm power optimization including flow variability”. Renewable Energy. Revista Elsevier. 2015.

- <<http://iipdigital.usembassy.gov/st/portuguese/article/2014/01/20140109290220.html#axzz31GlsWHbf>>. Acessado em: 9 de Setembro de 2015.
- JÚNIOR, F. D. M. “viabilidade técnica/econômica para produção de energia eólica, em grande escala, no Nordeste brasileiro”. Pós-Graduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras. 2009. 53p.
- JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; YALCIN, A. Nationwide assessment of Potencial Output from Wind Powered Generators. J appl. Meteor. 1976. 15p.
- JUSTUS, C. G.; MIKHAIL, A. “Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution Statistic”. ERda, UC 60. 1976.
- KARKI, R. “Renewable energy credit driven wind power growth for system reliability”. Revista Science Direct. 2006.
- LIMA, F. J. L.; CAVALCANTI, E. P.; SOUZA, E. P. “Avaliação do potencial eólico em cinco regiões do Estado da Paraíba”. Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 27, n. 1. 2010.
- LEITE, R. P. C. “Estudo de viabilidade econômica das principais fontes alternativas de energia no Brasil”. Trabalho de final de curso. Universidade de São Paulo- Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia Elétrica. 2013.
- LINARD, F. J. A. “Estimativas da velocidade do vento em altitude usando o software windographer”. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Ceará. 2010.
- LOPEZ, R. A., “Energia Eólica”. 2012. Autor: Editora: Artliber. 2ª ED. 2012. 266p.
- LÓPEZ, M. V. “Ingeniería de la energía eólica” Coleção Novas Energias. Faculdade de Física- Universidade de Barcelona. Primeira Edição. Editora Marcombo. 2010. 282p.
- FILHO, L. R. A. ; CREMASCO, C. P., SERAPHIM, O. J., CANEPPELE, F. DE L., “Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de Weibull para o regime eólico e suas aplicações”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola. Eng. Agric. vol.31. 2011.
- MACHADO, R. R. “Estudo do potencial eólico do pontal do abreu – município de Viamão – RS”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio Grande. 2008.
- MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R., “Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso”. Revista Brasileira de Geografia Física. 2011.

- MARTINS, F.R., GUARNIERI, R.A., PEREIRA, E.B., “O aproveitamento da energia eólica”. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, 1304, 2008.
- MELO, M. S. DE M., “Energia Eólica: Aspectos Técnicos E Econômicos”. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.
- MELO, F. D. C.; LEÃO, R. P. S., COSTA, A. A.; LIMA, D. K. S.; CHAVES, C.M. N. M., “Modelagem climática regional (downscaling) e aplicações em energia eólica: variabilidade e mudanças climáticas”. Revista Ciência e Natura, Santa Maria. Edição Esp. p. 133 – 135. 2013
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. “Wind Energy Explained:Theory, Design and Application”. Book, ed. John Wiley & Sons LTD, Language: English. 2002. 576p.
- MENDES, C. R. S. “Proposta de uma Metodologia Livre para Avaliação de Potencial Eólico de Minas Gerais”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Universidade Federal de São João del Rei. 2011.
- MENEZES, A. E. DA S. “Aproveitamento Eólico para uma Vila De Pescadores”. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2012.
- MMA.Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 001, de 08 de março de 1990. Dispõe sobre critérios e padrões de emissão de ruídos, das atividades industriais. Disponível em: [www.mma.gov.br/port/conama/legiano.cfm?codlegitipo=3](http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano.cfm?codlegitipo=3). Acessado em: 10 de maio de 2015.
- MME, Ministério de Minas e Energia. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia. Disponível em:< <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>htm. Acesso em 20 de agosto de 2015.
- MONTEZANO, B. E. M., “Estratégias para identificação de sítios eólicos promissores usando sistema de informação geográfica e algoritmos evolutivos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2012.
- MOREIRA, H. M. ; GIOMETTI, A. L. B. DOS R., “Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa”. Revista Contexto Internacional. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Instituto de Relações Internacionais. Contexto int. vol.30 no.1. 2008.

- MUNHOZ, F. C.; GARCIA, A. “Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava–SP”. Revista Brasileira de Meteorologia, v.23, n.1, 30-34, 2008.
- NEVES. P. S. “Interligação da Geração Eolielétrica com o Sistema Elétrico de Potência”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Bahia, UFBA. Salvador, BA, Brasil. 2014.
- OLIVEIRA, L. S., “Regras e Boas Práticas para Instalação de Torres Anemométricas Voltadas para Estudo de Potencial Eólico”. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2011.
- PADARATZ, I. J. “Velocidade do Vento Básica o Brasil”. Dissertação de mestrado em Ciências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1977.
- PANORAMA COMERC. Disponível em: <<http://www.panoramacomerc.com.br/?p=2400>>. Acesso em: 24 de setembro de 2015.
- PARIZZOTO, R. R.; “Instalação e avaliação de um sistema de bombeamento d’água com aerogerador de pequeno porte para propriedades rurais, na cidade de Cascavel-PR”. Dissertação de mestrado em Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2014. 69p.
- PDEE 2010-2019. Plano Decenal de Expansão de Energia 2010 – 2019. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2011.
- PDE. Plano decenal de expansão de energia. 2030. Rio de Janeiro: EPE, 2007.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. “Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba. Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p
- PETRY, A. P.; MATTUELLA, J. M. L.” Análise do potencial eólico e estimativa da geração de energia empregando o “software” livre Alwin”. IEM. 2007. 141p.
- PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2023. (PDE). Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014.
- POBLACIÓN, E. A., “Influência das estruturas de suporte dos sensores nas medições da velocidade do vento: Propostas de correções às séries”. Dissertação em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2012.
- POLIZEL, L. H., “Metodologia de Prospecção e Avaliação de Pré-Viabilidade Expedida de Geração Distribuída (GD): Caso eólico e hidráulico”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo, USP. 2007.

PORTAL ABEEÓLICA. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/>. Acesso em: 10 de março de 2015.

PORTAL ABEEÓLICA. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/2712-china-tem-corrída-por-energia-e-C3%B3lica.html>> Acesso em 10 de Agosto de 2015.

RAHMAN, S. M., KIRKMAN, G. A. “Costs of certified emission reductions under the Clean Development Mechanism of the Kyoto Protocol”. *Revista Energy Economics*. 2014.

RBA. Rede Brasil Atual. Disponível em: <<http://www.redebrasilatual.com.br/mundo/2015/08/obamadriblasenadoelancaplanop-aracortedeco24659.Html>>. Acessado em: 24 de setembro de 2015.

REBOITA, M. S. “Introdução à Estatística Aplicada à Climatologia. Parte II – Distribuições de Probabilidades”. Projeto PAE. Universidade de São Paulo. 2005

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZ, T.; ROCHA, R. R. “Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul”. *TERRÆ DIDÁTICA* 8(1):34-50, 2012.

REIS, M. M.; OLIVEIRA Jr., D. S.; CARVALHO, Paulo C. M. Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

ROHATGI, J. S., MEDEIROS, A.L.R., Soares, A.M.C. & Noé, A.O F., “Describing Wind Speed Variations by Weibull Distribution for Energy Estimation”. *Anais do IV Congresso Brasileiro de Energia*. 1987. vol.1, pp 237-247, Rio de Janeiro.

ROHATGI, J. S. & NELSON, V. “Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power”. Ed Alternative Energy Institute, West Texas, A&M University, Canyon, TX, USA. 1994.

SALVADOR, P. C. “Influência do perfil vertical de velocidades no funcionamento de um aerogerador: Medições realizadas com LIDAR. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Porto. 2012.

SANTANA, L. V. R. “Análise do comportamento da velocidade do vento na região Nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40”. Dissertação de Mestrado em Biometria e Estatística. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2014. 59p.


SANTANA, F.B.; ARRUDA, P.H.Z.; FARIA, J.L.B.; NOGUEIRA, J.S. “Estudo preliminar da velocidade e direção dos ventos, em Cuiabá, MT, Brasil”. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v.16, n.2, p. 175-180, 2008.

- SANTOS, A. A.; RAMOS, D. S.; SANTOS, N. T. F.; OLIVEIRA, P. P. “Projeto de geração de energia eólica”. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Santa Cecília. 2006. 75p.
- SENTELHAS, PC; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.R. “Meteorologia Agrícola”. Apostila revisada. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Ciências Exatas. 2007.
- SICILIANO, G. C. C. S. “Estratégias de Compra de Contratos em Leilões Multiproduto de Fontes Renováveis”. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. 2010.
- SILVA, N. F. “Fontes de Energia Renováveis Complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica”. Tese de Doutorado em Ciências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006. 267p.
- SILVA, B.B. da; ALVES, J.J.A.; CAVALCANTI, E.P.; DANTAS, R.T. “Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.3. 2002.
- SILVA, P. C. “Sistema para Tratamento, Armazenamento e Disseminação de Dados de Vento”. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1999.
- SILVA, R. G. “Característica de vento na região Nordeste: Análise, modelagem e aplicação para aplicação de Centrais Eólicas”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil. 2003. 141p.
- SANSIGOLO, C. A. Distribuição de Probabilidade de Velocidade e Potência do Vento. Revista Brasileira de Meteorologia. v.20, n.02, 207-214. 2005.
- TERCIOTE, R. “A energia eólica e o meio ambiente”. Encontro de Energia no Meio Rural. 2002.
- TRACTEBEL ENERGIA. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-complementares/central-eolica-beberibe>>. Acesso em 10 de maio de 2015.
- VARELLA, C. A.A., JUNIOR, D. S. “Estudo do interpolador idw para utilização em agricultura de precisão”. Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro. IA – Departamento de Solos. Pós-Graduação em Ciência do Solo. 2000.
- VESTAS. Catálogo de aerogeradores. Disponível em: <<http://www.vestas.com>>. Acesso em: 20/11/2014.

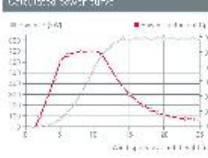
- WANG, L.; TAN, A. C.C., GU, Y.; YUAN, J.” A new constraint handling method for wind farm layout optimization with lands owned by different owners”. Renewable Energy. Revista Elsevier. 2015.
- WAGNER, R. “Accounting for the speed shear in wind turbine power performance measurement”. 2010.
- WATTS, D.; JARA, D. “Statistical analysis of wind energy in Chile”. Renewable Energy. Revista Elsevier. 2010.

# ANEXO A

001 4
EMERCON E-48 (E-48) 800 kW
48
001 4



### Unifocal power curve



Wind speed (m/s)	Power (kW)	Power Coefficient (%)
1	0.0	0.00
2	0.0	0.00
3	0.0	0.00
4	0.0	0.00
5	0.0	0.00
6	0.0	0.00
7	0.0	0.00
8	0.0	0.00
9	0.0	0.00
10	0.0	0.00
11	0.0	0.00
12	0.0	0.00
13	0.0	0.00
14	0.0	0.00
15	0.0	0.00
16	0.0	0.00
17	0.0	0.00
18	0.0	0.00
19	0.0	0.00
20	0.0	0.00
21	0.0	0.00
22	0.0	0.00
23	0.0	0.00
24	0.0	0.00
25	0.0	0.00

### Technical specifications E-48

**Rated power:** 800 kW

**Rotor diameter:** 48 m

**Hub height in meter:** 52 / 60 / 65 / 70

**Wind class (IEC):** W2 III

**Wind class (IEC):** IEC/EN IIA

**WEC concept:** Gear box, full speed range, 3 stage gearbox, 4 pole generator

**Water:** No

**Yield:** Annual yield with 10% pitch zone

**Approved operation:** IEC/EN 61400-1

**Service life:** 20 years

**Life expectancy:** IEC/EN 61400-1

**Service access:** Full height service access

**Pitch system:** IBERCON pitch system, permanent magnet synchronous motor, full height, 200000 Nm torque capacity

**Drive train with generator:** Full height, 200000 Nm torque capacity

**Grid feed:** IBERCON generator

**Brake systems:** 2 brake systems - full height - full speed range - 200000 Nm torque capacity


**Yaw system:** Full height, 200000 Nm torque capacity

**Out of the wind speed:** 25 km/h

**Remote monitoring:** IEC/EN 61400-30

## E-48

800 kW



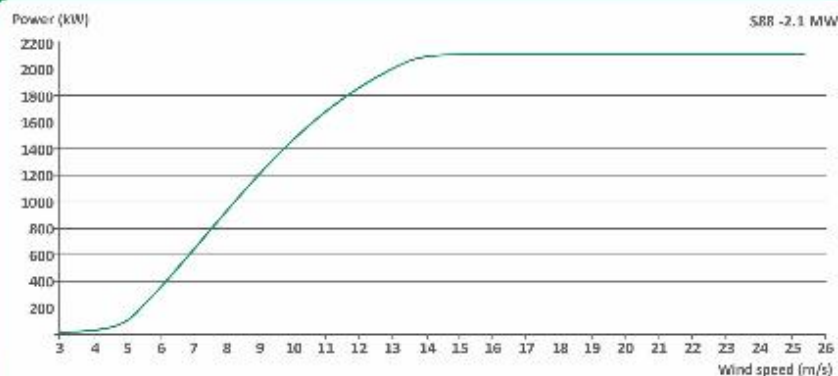
- 1 Main frame
- 2 Pitch drive
- 3 Pitch control system
- 4 Pitch angle sensor
- 5 Pitch stop
- 6 Pitch brake

Technical specifications are subject to change without notice. © 2014 Emerson Power Solutions



## S88 - 2.1 MW - POWER CURVE AND TECHNICAL SPECIFICATIONS

<b>OPERATING DATA</b>	Rated power	2.1 MW
	Cut-in wind speed	4m/s
	Rated wind speed	14m/s
	Cut-out wind speed	25m/s
	50 years gust wind speed	39.5m/s
	Hub height	80m & 100 m
	Wind Class	IIA
<b>ROTOR</b>	Rotational Speed	15.1 - 17.7 rpm
	Pitch system	Electric drive with electric brake, gearbox, frequency converter & batteries.
	Diameter	88m
	Swept area	6,082m <sup>2</sup>
<b>GENERATOR</b>	Blade material type	Fiberglass / Epoxy
	Type	Induction generator with slip rings, variable rotor resistance with Suzlon Flexi slip control system
	Rated power	2,100 kW
	Rated voltage	690 / 600V
	Frequency	50 / 60Hz
	Protection	IP54 & IP23 (for slip rings)
	Cooling system	Air cooled (IC6A1A6)
	Insulation	Class H
	Slip control	Flexi-Slip providing slip up to 16.7%
	<b>BRAKING SYSTEM</b>	Aerodynamic brake
Mechanical brake		Hydraulic disc brake, activated by hydraulic pressure
<b>GEARBOX</b>	Type	3 stages (1 planetary & 2 helical)
	Ratio	1.98.8 (±0.5%)
	Nominal load	2,310 kW
<b>YAW SYSTEM</b>	Type	Electric motors with brake, gearbox & pinion
	Bearings	Friction bearing with gear rim
<b>CERTIFICATIONS</b>	Design standards	GL 2003 with supplement 2004
	Quality	ISO 9001:2008
<b>TOWER</b>	Type	Tubular in 4 sections



Limit product of parameters and conditions.

Subject to change without notice due to difference in geometry, construction and / or change in equipment or technological requirements.



# ANEXO B

7

Mapa Territorial de Parques Eólicos - PARTE I

## Dados de Cadastro de Parques Eólicos Instalados no Ceará: Configuração do Parque, Fator de Potência, Produção Estimada, Fator de Capacidade Estimado e Receita Mensal

<b>UEE BOINS VENTOS</b>	
Configuração do Parque	22 aerogeradores de 2,1 MW / 2 de 1,9 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	840 e 680
Produção Estimada (kW)	173798400
Potência instalada (kW)	50000
Fator de capacidade estimado	39,68%
Receita (R\$)	38235648
<b>UEE CANOÁ QUEBRADA</b>	
Configuração do Parque	22 aerogeradores de 2,1 MW / 6 de 1,8 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	840 e 831
Produção Estimada (kW)	205562160
Potência instalada (kW)	57000
Fator de capacidade estimado	41,17%
Receita (R\$)	45223675,2
<b>UEE ENACEL</b>	
Configuração do Parque	15 aerogeradores de 2,1 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	840
Produção Estimada (kW)	110376000
Potência instalada (kW)	31500
Fator de capacidade estimado	40,00%
Receita (R\$)	24282720
<b>UEE ICARAIZINHO</b>	
Configuração do Parque	26 aerogeradores de 2,1 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	840
Produção Estimada (kW)	191318400
Potência instalada (kW)	54600
Fator de capacidade estimado	40,00%
Receita (R\$)	42090048
<b>UEE PRAIA FORMOSA</b>	
Configuração do Parque	50 aerogeradores de 2.088 kW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	835
Produção Estimada (kW)	365730000
Potência instalada (kW)	104400
Fator de capacidade estimado	39,99%
Receita (R\$)	80460600
<b>UEE VOLTA DO RIO</b>	
Configuração do Parque	28 aerogeradores de 1,5 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	421
Produção Estimada (kW)	103262880
Potência instalada (kW)	42000
Fator de capacidade estimado	28,07%
Receita (R\$)	22717833,6



16

## Dados de Cadastro de Parques Eólicos Instalados no Ceará:

### Configuração do Parque, Fator de Potência, Produção Estimada, Fator de Capacidade Estimado e Receita Mensal

<b>UEE BEBERIBE</b>	
Configuração do Parque	32 aerogeradores de 800 kW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	255
Produção Estimada (kW)	71481600
Potência instalada (kW)	25600
Fator de capacidade estimado	31,88%
Receita (R\$)	15725952
<b>UEE PRAIAS DE PARAÍURU</b>	
Configuração do Parque	16 aerogeradores de 1,8 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	831
Produção Estimada (kW)	116472960
Potência instalada (kW)	28800
Fator de capacidade estimado	46,17%
Receita (R\$)	25624051,2
<b>UEE PRAINHA</b>	
Configuração do Parque	20 aerogeradores de 500 kW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	164
Produção Estimada (kW)	28732800
Potência instalada (kW)	10000
Fator de capacidade estimado	32,80%
Receita (R\$)	6321216
<b>UEE TAÍBA</b>	
Configuração do Parque	10 aerogeradores de 500 kW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	164
Produção Estimada (kW)	14366400
Potência instalada (kW)	5000kw
Fator de capacidade estimado	32,80%
Receita (R\$)	3160608
<b>UEE TAÍBA ALBATROZ</b>	
Configuração do Parque	11 aerogeradores de 1,5 MW
Fator de Potência p/ vento de 8m/s (kW)	421
Produção Estimada (kW)	40567560
Potência instalada (kW)	16500
Fator de capacidade estimado	28,07%
Receita (R\$)	8924863,2



<b>Total</b>	<b>39,3%</b>	<b>37,9%</b>	<b>96,3%</b>
--------------	--------------	--------------	--------------

Parque Eólico	Fator de capacidade Certificado (3)	Fator de capacidade real últimos 24 meses (3)	Taxa de eficiência
<b>Complexo Eólico SIIF <sup>(1)</sup></b>	<b>38,8%</b>	<b>40,4%</b>	<b>104,1%</b>
<b>Complexo Eólico - Bons Ventos <sup>(2)</sup></b>	<b>40,0%</b>	<b>42,7%</b>	<b>106,6%</b>
<b>Total</b>	<b>39,3%</b>	<b>41,4%</b>	<b>105,2%</b>

<sup>(1)</sup> Complexo SIIF é formado pelos Parques eólicos Paracuru, Foz do Rio Chôá, Icaraizinho e Praia Formosa.

<sup>(2)</sup> Complexo Bons Ventos é formado pelos Parques Eólicos Bons Ventos, João Albaroz e Canoa Queimada.

<sup>(3)</sup> O Fator de capacidade considera perdas na rede básica para o P50, estimada em 2,5%.

O Complexo eólico Atlântica, os parques eólicos de Rosa dos Ventos e o Complexo eólico Santa Clara não estão sendo considerados na tabela acima pelo fato de não terem histórico de no mínimo doze meses, o que pode distorcer a análise do fator de capacidade e a taxa eficiência da Companhia.

Vale mencionar ainda que o Parque Eólico Campo dos Ventos II, com 30 MW, já está apto a gerar energia e tem recebido a receita correspondente ao faturamento contratado no Leilão de Energia de Reserva (LER) 2010, ainda que o término da construção da ICC (Instalação de Transmissão de Interesse Exclusivo de Contratos de Geração para Conexão Compartilhada) esteja pendente.

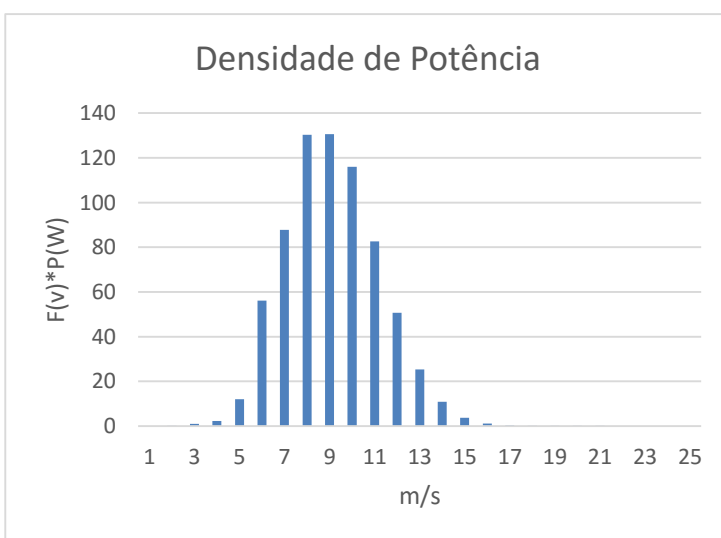
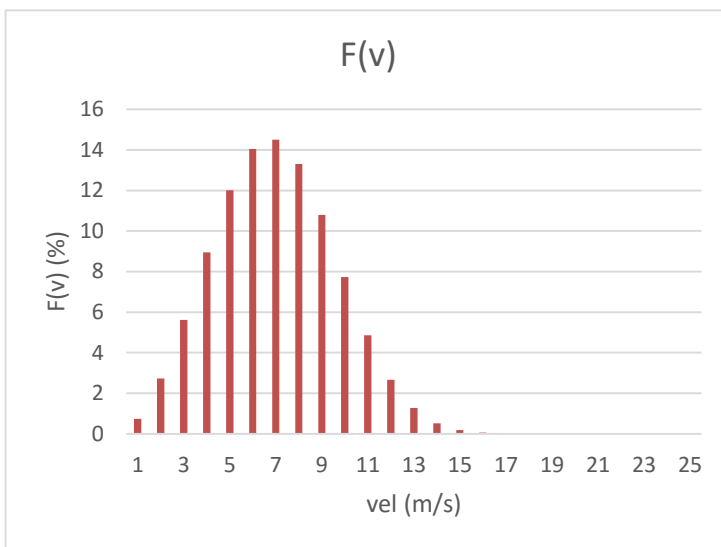
Finalmente, é importante destacar que o portfólio de ativos da CPFL Renováveis é diversificado tanto em termos de fontes como em localização geográfica. Essa característica é relevante, pois minimiza os efeitos das sazonalidades, que variam de acordo com a fonte renovável e também com a localização geográfica de cada um dos ativos. A descrição do portfólio em operação está detalhada no Anexo I deste documento.

# APÊNDICE A

Cálculo do Fator de Capacidade médio para a região do parque de Paracuru.

P(W)	2100	Região do Parque de Paracuru				
v2	k1	k atualizado	gama	c1	Cálculo n	c atualizado
8,23	2,46	2,65	0,8868	7,2	0,22	8,43

Vento [m/s]	P [W]	F(v) (%)	P(W)*F(v)
1	0	0,931	0,00
2	5	2,863	0,14
3	18	5,353	0,96
4	25	7,987	2,00
5	100	10,319	10,32
6	400	11,932	47,73
7	605	12,539	75,86
8	980	12,063	118,22
9	1210	10,658	128,96
10	1500	8,654	129,81
11	1700	6,454	109,72
12	1900	4,415	83,88
13	2000	2,764	55,28
14	2100	1,580	33,18
15	2100	0,823	17,27
16	2100	0,389	8,17
17	2100	0,166	3,50
18	2100	0,064	1,35
19	2100	0,022	0,47
20	2100	0,007	0,15
21	2100	0,002	0,04
22	2100	0,000	0,01
23	2100	0,000	0,00
24	2100	0,000	0,00
25	2100	0,000	0,00
Somatório			827,02

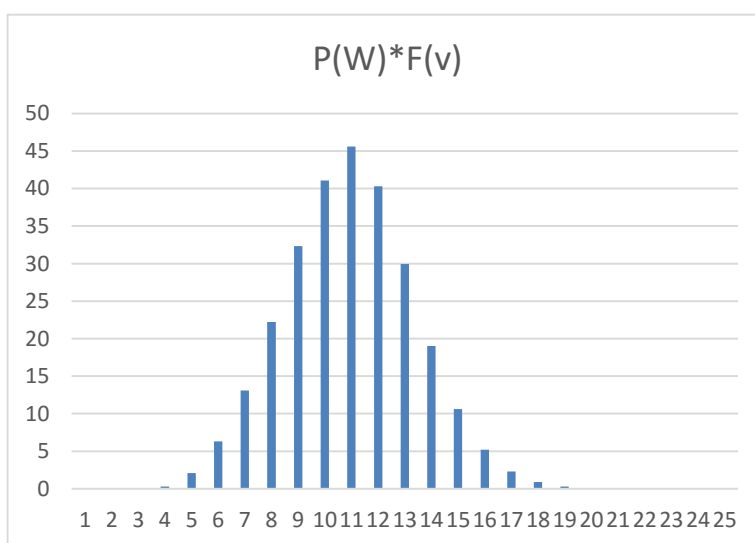
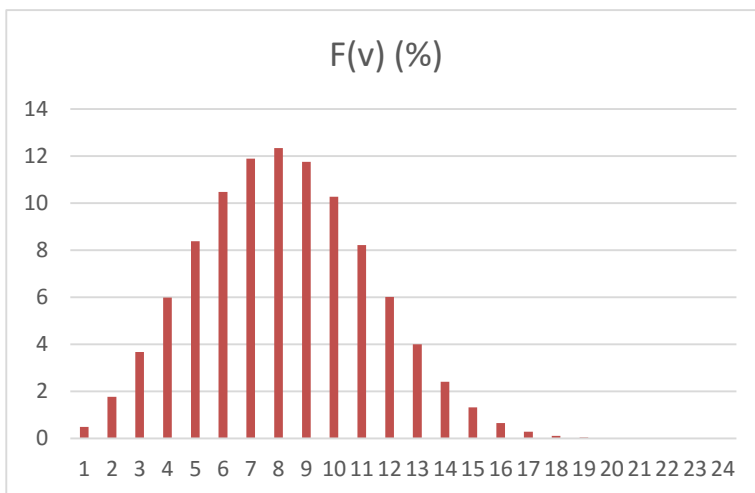


EAG (kWh)	7244693,27
FC	0,39
Máquinas	12
EAG média (GWh)	86,936

Cálculo do Fator de Capacidade médio para a região do parque de Beberibe

P(W)	2100	Região do Parque de Beberibe				
v2	k1	k atualizado	gama	c1	Cálculo n	c atualizado
9,33	2,66	2,86	0,8884	7,3	0,227	8,54

Vento [m/s]	P [W]	F(v) (%)	P(W)*F(v)
1	0	0,483	0,00
2	0	1,757	0,00
3	0	3,664	0,00
4	5	5,979	0,30
5	25	8,379	2,09
6	60	10,476	6,29
7	110	11,887	13,08
8	180	12,339	22,21
9	275	11,750	32,31
10	400	10,265	41,06
11	555	8,214	45,59
12	671	6,004	40,28
13	750	3,994	29,96
14	790	2,409	19,03
15	810	1,312	10,63
16	810	0,642	5,20
17	810	0,281	2,28
18	810	0,110	0,89
19	810	0,038	0,31
20	810	0,011	0,09
21	810	0,003	0,02
22	810	0,001	0,01
23	810	0,000	0,00
24	810	0,000	0,00
25	810	0,000	0,00
		Somatório	271,63

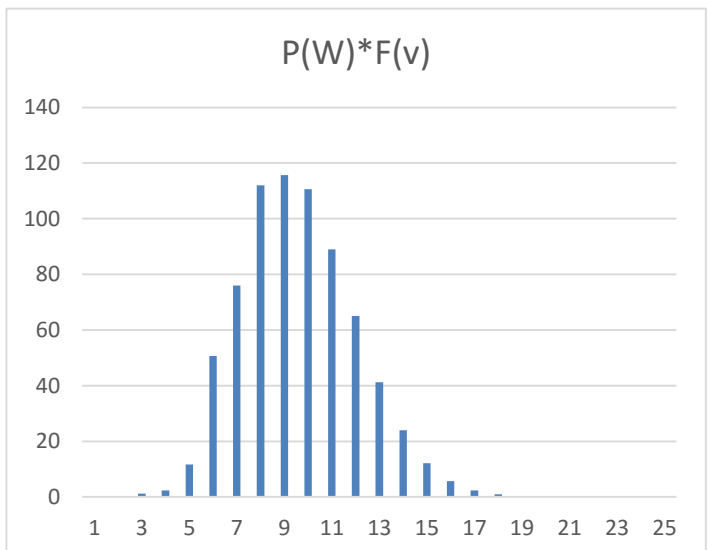
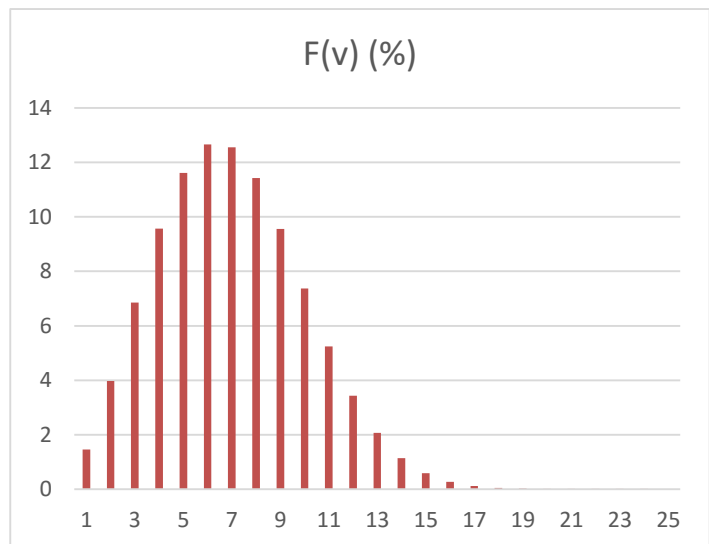


EAG (kWh)	2379449,76
FC	0,34
Máquinas	32
EAG média (GWh)	76,142

Cálculo do Fator de Capacidade médio para a região do parque de Camocim.

P(W)	2100	<b>Região próxima ao Parque de Camocim</b>			
v2	k1	k atualizado	c1	Cálculo n	c atualizado
8,30	2,31	2,49	7.66	0,236	8,936

Vento [m/s]	P [W]	F(v) (%)	P(W)*F(v)
1	0	1,068	0,00
2	5	2,934	0,15
3	18	5,140	0,93
4	25	7,356	1,84
5	100	9,270	9,27
6	400	10,617	42,47
7	605	11,225	67,91
8	980	11,046	108,25
9	1210	10,163	122,97
10	1500	8,763	131,44
11	1700	7,088	120,50
12	1900	5,381	102,23
13	2000	3,832	76,64
14	2100	2,559	53,74
15	2100	1,601	33,62
16	2100	0,938	19,69
17	2100	0,513	10,78
18	2100	0,262	5,51
19	2100	0,125	2,63
20	2100	0,056	1,17
21	2100	0,023	0,48
22	2100	0,009	0,19
23	2100	0,003	0,07
24	2100	0,001	0,02
25	2100	0,000	0,01
		Somatório	912,49



EAG(kWh)	7993449,54
FC	0,43
Máquinas	50
EAG média (GWh)	173,666