



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15733-TDI/1479

ESTUDO DE ENERGIA EÓLICA PARA A ILHA DE MARAJÓ - PA

Eliude Introvini da Cruz Segundo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelos Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada em 2 de março de 2009.

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.27.21.18>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15733-TDI/1479

ESTUDO DE ENERGIA EÓLICA PARA A ILHA DE MARAJÓ - PA

Eliude Introvini da Cruz Segundo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelos Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada em 2 de março de 2009.

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.27.21.18>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cruz Segundo, Eliude Introvini da .
C889e Estudo de energia eólica para a Ilha de Marajó - PA / Eliude
Introvini da Cruz Segundo. – São José dos Campos : INPE, 2009.
97p. ; (INPE-15733-TDI/1479)

Dissertação (Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientador : Dr. Enio Bueno Pereira.

1. Energia eólica. 2. Mapeamento eólico. 3. Modelo ETA.
4. Previsão de Vento. I.Título.

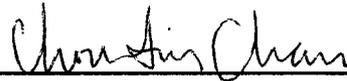
CDU 621.548:551.556.3

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia**

Dra. Chou Sin Chan



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Enio Bueno Pereira



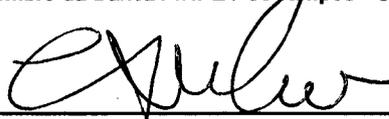
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Clóvis Angeli Sansigolo



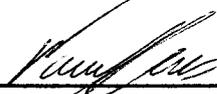
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Carlos Afonso Nobre



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Vanessa Gonçalves Guedes



Convidado(a) / CEPEL / Rio de Janeiro - RJ

Aluno (a): Ellude Introvini da Cruz Segundo

São José dos Campos, 02 de março de 2009

*A meus queridos pais, Roseli e Eliude, a
minha irmã Djanara, a minha noiva Naira
e à vovó Zeny.*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus que me deu força, saúde e garra para realizar este trabalho.

Ao Dr. Enio, meu orientador, que não hesitou em aceitar a proposta de realizarmos este trabalho e pela paciência, atenção, apoio e real orientação. Desejo que essa parceria se estenda por muitos outros trabalhos.

Aos amigos Cap. Valdeci França e Ten. Antonio Queiroz, do Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) em Brasília, que forneceram dados METAR sem nenhum entrave burocrático.

A meus amados pais Roseli e Eliude que me ofereceram um grande apoio para chegar ao INPE e pelo carinho, pelo amor incondicional, pela educação e por tudo o que proporcionaram e continuam proporcionando na minha vida, todos os dias.

A minha querida irmã Djanara que é uma grande amiga e sempre esteve disposta a ajudar, desde a época da graduação e ainda hoje sempre presta “socorro” mesmo estando tão longe e à vovó Zeny que mesmo com a idade avançada sempre ofereceu muito carinho e dedicação.

A minha amada noiva, Naira, pelo seu companheirismo, pelo seu amor, dedicação e compreensão. Por me incentivar sempre, em qualquer situação, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos amigos que conquistei no INPE, principalmente aos da turma de mestrado de 2006. Desejo a todos, sem exceção, que tenham vida longa, muita coragem para enfrentar os desafios da vida, muito sucesso em suas carreiras e que essa amizade nunca se acabe.

Agradeço em especial à Dra. Chou e aos amigos André, Diego e Gustavo, os quais muito contribuíram para a realização deste trabalho.

À Dra. Marley pelo apoio e louvável trabalho na coordenação da pós-graduação em meteorologia do INPE.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

RESUMO

A Ilha da Marajó, no estado do Pará, região norte do Brasil, apresenta um baixo nível de desenvolvimento econômico comparativamente com outras regiões do país. Entre outros fatores que limitam esse desenvolvimento está a baixa disponibilidade de energia que, hoje, provem exclusivamente de termoelétricas em sistemas isolados. Este trabalho teve como objetivo fazer um levantamento preliminar sobre a viabilidade da geração de energia eólica na região. Os resultados indicaram que os melhores ventos ocorrem nos meses de setembro a novembro ao longo da região costeira, na parte norte-nordeste da ilha. Para essa região verificou-se um potencial eólico médio de 151 W/m^2 e um fator de forma de 1,7. Com base nos dados de vento obtidos pelo modelo Eta e empregando-se o pacote comercial WAsP de análise de sistemas eólicos, foi desenvolvido um cenário de emprego da energia eólica em esquema de co-geração com as termoelétricas hoje empregadas na região. Os resultados indicam que, apesar do potencial relativamente modesto apresentado, e utilizando-se um aerogerador de comercial de fabricação nacional de 800 kW, pode-se chegar a uma potencial produção de 1.361 MWh/ano com Fator de Capacidade de 0,195. Mesmo com esses resultados relativamente modestos, o retorno do investimento por gerador, em esquema de co-geração, foi calculado em 3 anos. Além disso, esse esquema evitaria uma emissão de 981 t/ano de CO_2 , 4,6 t/ano de SO_2 e 1,9 t/ano de NO_x pela economia de aproximadamente 4.083 m^3 /ano de óleo Diesel deslocados pela inclusão da geração de energia eólica.

STUDY OF WIND POWER FOR THE MARAJÓ ISLAND

ABSTRACT

The Island of the Marajo, in the state of Para, region north of Brazil, presents a low level of economic development when compared with other regions of the country. Among others factors that limit this development are the poor supply of energy that, today, comes exclusively from isolated thermo-electricity plants. This work aims at to providing a preliminary survey on the viability of wind-energy generation in the region. The results indicate that the best winds occur between September and November throughout the coastal region, in the north-northeast part of the island. For this region an average wind power density of 151 W/m^2 was observed, with a shape parameter of 1.7. On the basis of the wind data generated by the mesoscale model Eta, and using the commercial package WAsP for wind energy analysis, we developed some scenarios for wind energy applications in the region. The results indicate that, in spite of fact that the island presented a relatively modest wind potential, it could be exploited in a co-generation scheme with the existing thermal-electricity plants operating in the area with a 3-year payback factor. For these scenarios, we employed an 800kW wind turbine of national manufacture. We arrived with a potential electricity yield of 1,361 MWh/year with a Capacity Factor of 0.195. Moreover, by displacing 4,083 m³/year of Diesel consumption for electricity generation, the addition of wind energy could prevent an emission of 981 ton/year of CO₂, 4.6 ton/year of SO₂, and 1.9 ton/year of NO_x.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Geração de energia elétrica no Brasil	24
1.2	Sistema Interligado e Sistema Isolado de Energia.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	Potencial Eólico Nacional.....	29
3	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	35
3.1	Características Gerais da Ilha de Marajó	35
3.2	Relevo da Ilha de Marajó	36
3.3	Vegetação da Ilha de Marajó	36
3.4	Clima da Ilha de Marajó	37
3.5	Economia da Ilha de Marajó	41
3.6	Acesso à Ilha de Marajó.....	41
3.7	Aspectos Energéticos da Ilha de Marajó.....	42
4	DADOS E METODOLOGIA.....	47
4.1	Dados.....	47
4.2	O Modelo Eta	48
4.3	Avaliação do Modelo.....	54
4.4	Estimativa do Potencial de Energia Produzida	56

4.5	Emissão de Gases	59
4.6	Procedimentos adicionais	62
5	RESULTADOS.....	65
5.1	Mapeamento Sazonal	65
5.2	Mapeamento Anual	68
5.3	Dados observados de superfície e Avaliação do Modelo Eta	68
5.4	Potencial de Energia Elétrica Produzida	72
5.5	Emissão de Gases	75
5.6	Cenário de geração estimado	76
5.7	Custo da Geração de Energia no Brasil no Futuro.....	81
6	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	ANEXO I.....	94
	ANEXO II.....	96

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Matriz de Geração de Energia Elétrica do Brasil.	24
1.2 - Mapa do Sistema Interligado Nacional – horizonte 2007 / 2009.	26
1.3 - Mapa do Sistema Isolado - situação em outubro de 2003.	27
1.4 - Sistemas Isolados da Ilha de Marajó.	28
2.1 - Velocidade média anual do vento (m/s) a 50 m de altura para o Brasil.	29
2.2 - Velocidade média anual do vento (m/s) a 50 m de altura para a Ilha de Marajó.	31
3.1 - População por classe e área (km ²) da Ilha de Marajó.	35
3.2 – Velocidade (m/s) e freqüência (%) média anual do vento por direção.	38
3.4 - Vias de acesso para a Ilha de Marajó: aeroportos, portos e estradas.	42
3.5 - Número de domicílios com e sem energia elétrica na Ilha de Marajó.	44
3.6 - Consumo de Energia Elétrica por Setor - Ilha de Marajó x Brasil.	46
4.1 - Estações da rede do DECEA.	47
4.2 - Distribuição vertical e espessura das camadas atmosféricas representadas no modelo Eta com 50 (linhas vermelhas) e 38 níveis (linhas pretas).	49
4.3 - “Grade-E” de Arakawa (BLACK, 1994).	50
4.4 - Seção vertical idealizado da topografia do modelo Eta e distribuição das variáveis na vertical (u, T, Ps).	51
4.5 - Domínio das rodadas do Eta com topografia em metros.	53
4.6 - Curva de potência e Distribuição estatística do vento em uma central eólica com potência nominal de 5 MW (10 x 500 kW).	57
4.7 - Média das emissões específicas de CO ₂ em g/kWh a partir da Geração de eletricidade de combustíveis fósseis em 2000.	60
4.8 - Média das emissões específicas de SO ₂ em g/kWh a partir da Geração de eletricidade de combustíveis fósseis em 2000.	61

4.9 - Média das emissões específicas de NO _x em g/kWh a partir da Geração de eletricidade de combustíveis fósseis em 2000.	62
5.1 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (DJF).....	66
5.2 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (MAM).....	66
5.3 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (JJA).....	67
5.4 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (SON).....	67
5.5 - Velocidade média anual do vento (m/s) a 50 m.	68
5.6 - Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) a 10 m e dos erros RMSE e BIAS para SBBE (01° 23' S / 048° 29' W / 17 m).....	69
5.7 - Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) a 10 m e dos erros RMSE e BIAS para SBMQ (00° 03' N / 051° 04' W / 16 m).	70
5.8 - Freqüência da direção do vento para SBBE segundo (a) Modelo Eta e (b) Observado.	71
5.9 - Freqüência da direção do vento para SBMQ segundo (a) Modelo Eta e (b) Observado.	71
5.10 - Freqüência da direção do vento e Distribuição de Weibull para o Norte da Ilha de Marajó.....	73
5.11 - Central Geradora Eólica Millennium, Mataracá, PB.	79

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Usinas UTE em Operação na Ilha de Marajó.	43
3.2 - Número de Consumidores e Consumo (kWh) na Ilha de Marajó.....	45
5.1 - Parâmetros e propriedades do vento para localidades em Santa Catarina.	74
5.2 - Potencial Eólico estimado para a Ilha de Marajó.	74
5.3 - Emissão evitada de gases para um aerogerador instalado.	76
5.4 - Potência Nominal, Energia Anual e Custo pelo número de aerogeradores.	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ou Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas.
GEE	Gases do Efeito Estufa.
BEN	Balanço Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SIN	Sistema Interligado Nacional.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
BIG	Banco de Informações de Geração - ANEEL
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
REDE	Grupo proprietário da Celpa
CELPA	Centrais Elétricas do Pará S.A.
Guascor	Grupo industrial privado espanhol que promove estudos, projetos, comércio, construção e operação de sistemas de geração de energia elétrica.
CEPEL	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
MEAPA	Mapeamento de Energias Alternativas no Estado do Pará.
NYSERDA	New York State Energy Research and Development Authority
DoE-US	Department of Energy
MASS	Mesoscale Atmospheric Simulation System
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
SEPOF	Secretaria Executiva de Planejamento, Orçamento e Finanças.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.
UTE	Usina Termelétrica de Energia: usina elétrica acionada por energia térmica, ou seja, instalação na qual a energia química contida em combustíveis fósseis é convertida em energia elétrica, estando ou não acopladas diretamente ao gerador elétrico.
PIE	Produção Independente de Energia: referente ao destino da energia.
SP	Serviço Público: referente ao destino da energia.
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
GTON	Grupo Técnico Operacional da Região Norte.
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ENOS	El Niño Oscilação Sul
TSM	Temperatura da superfície do mar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
METAR	METeorological Aviation Report.
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo.
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo.
EMS	Estação Meteorológica de Superfície.
SBBE	Aeroporto de Belém, PA.
SBMQ	Aeroporto de Macapá, AP.
UTC	Universal Coordinated Time
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i> ou Programa de Aplicação e Análise de Atlas de Vento.
EWEA	European Wind Energy Association
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Unidade de comprimento em metros.
s	Unidade de tempo em segundos.
m/s	Unidade de velocidade dada em metros por segundo.
kW	kilowatt = 10^3 watts (potência ativa)
kWh	kilowatt hora = 10^3 watts por hora (energia)
MW	Megawatt = 10^6 watts (potência ativa)
MWh	Megawatt hora = 10^6 watts por hora (energia)
GW	Gigawatt = 10^9 watts (potência ativa)
GWh	Gigawatt hora = 10^9 watts por hora (energia)
kWp	Potência de pico.
kVA	Unidade de potência aproximadamente igual ao Watt.
mm	Unidade de chuva em milímetros.
W/m ²	Watt por metro quadrado.
t	Tonelada métrica = 10^6 gramas

1 INTRODUÇÃO

Algumas projeções do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC), estabelecido pelas Nações Unidas e pela Organização Meteorológica Mundial em 1988, indicam um maior aumento da temperatura média da atmosfera da Terra para as próximas décadas em relação aos que já se observaram no passado histórico e geológico do planeta. Isso poderá ocasionar profundos efeitos em longo prazo sobre o clima como, por exemplo: derretimento do gelo e neve das regiões polares e geleiras continentais; aumento do nível dos mares e oceanos; aumento no índice pluviométrico em algumas regiões e diminuição em outras; aumento da frequência e rigor dos furacões e tempestades tropicais; entre outros.

O Protocolo de Kyoto¹ é um tratado internacional com compromissos rígidos para a redução da emissão de gases poluentes, principalmente os Gases do Efeito Estufa (GEE) que contribuem para o aquecimento global. Esse protocolo estimula os países signatários a cooperarem entre si, através de algumas ações básicas como, por exemplo, promover o uso de fontes energéticas renováveis.

Como consequência da aplicação do Tratado, espera-se estimular uma reforma no setor energético mundial, com mudanças na geração e no uso mais eficiente da energia e um afastamento gradual do emprego de combustíveis fósseis e maior uso dos recursos renováveis de energia.

¹ <http://www.eia.doe.gov/oiaf/kyoto/kyotorpt.html>

1.1 Geração de energia elétrica no Brasil

A matriz de geração de energia elétrica no Brasil é pouco diversificada. Ela é classificada como “hidrotérmica de grande porte” por ser predominantemente baseada em Hidroelétricas e Termoelétricas. Isso pode ser visto na Figura 1.1. Segundo o Balanço Energético Nacional - BEN 2008, ano base 2007 (EPE, 2008), no qual a comparação é feita pelos indicadores de 2007 em relação a 2006. Segundo esse balanço, houve um crescimento de 4,9% na geração de energia elétrica, sendo que a importação manteve-se praticamente igual. O BEN 2008 também mostra que houve um forte crescimento no emprego das fontes renováveis de energia. Por exemplo, a geração eólica triplicou, com um aumento de 135,8%, isso graças a programas governamentais de incentivo ao uso dos recursos renováveis de energia.

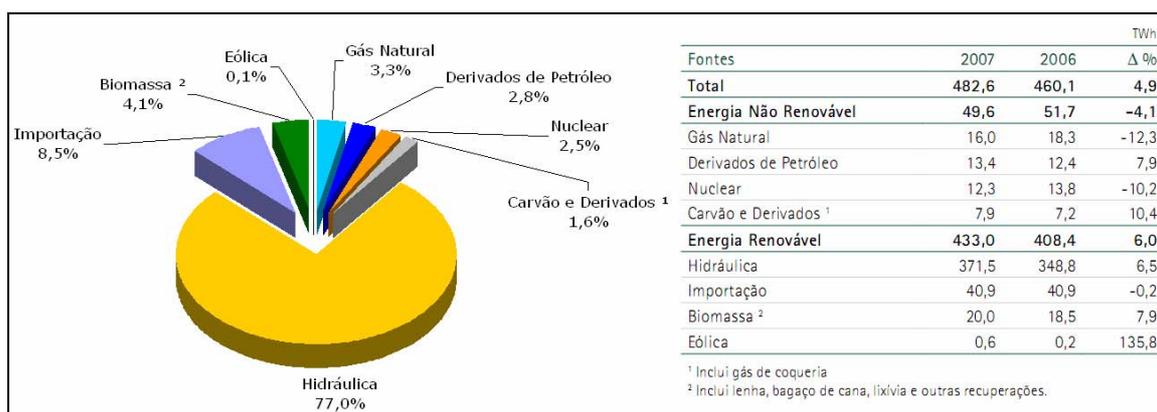


Figura 1.1 - Matriz de Geração de Energia Elétrica do Brasil.

Fonte: Adaptada de EPE (2008).

A hidroeletricidade foi por muito tempo considerada uma fonte de energia limpa e, por isso, uma alternativa positiva à queima de combustíveis fósseis. No entanto, uma série de estudos que avaliaram a emissão de GEE por essas usinas, revela resultados impressionantes que depõe contra esse conceito geral. Por exemplo, estudos realizados por Fearnside (2007 e 2006), mostraram que as emissões de gás carbônico e metano por usinas hidrelétricas podem ser responsáveis pelo agravamento do efeito estufa e isso a um nível maior do que teria sido se essa mesma energia tivesse sido gerada

pela queima de petróleo. Essa comparação teria sido ainda muito mais marcante caso fossem usados biocombustíveis adicionados ao combustível fóssil. Esse fato ilustra a importância de se rever alguns conceitos atualmente estabelecidos sobre os impactos ambientais da geração de energia elétrica e de se promover uma reforma no setor energético.

Atualmente, eólica é uma das fontes de energia renováveis mais viáveis, sob o ponto de vista de investimento, retorno financeiro e impacto ambiental, pois essa forma de geração de energia elétrica não provoca emissão de GEE após sua implantação e exerce pouco impacto ambiental dentre todas as fontes de geração de energia elétrica hoje conhecidas.

Informações sobre vento são fundamentais em estudos e projetos de geração de energia eólica e, sendo o vento uma variável meteorológica, justifica-se esse estudo no âmbito do curso de Meteorologia.

1.2 Sistema Interligado e Sistema Isolado de Energia

O Sistema Interligado Nacional de energia (SIN) é formado pelas empresas de geração e distribuição de energia elétrica das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, conforme podemos verificar na Figura 1.2. Sua produção representa aproximadamente 96,6% da capacidade de produção de eletricidade do país, o que equivale a 98.711,4 MW. Atende a uma área de aproximadamente 55% do território nacional e 97% da população nacional, ou seja, aproximadamente 38,8 milhões de consumidores (dados ONS e BIG em outubro de 2008).

O Sistema Isolado de energia é composto por pequenas centrais térmicas de energia e por unidades isoladas geradoras a óleo diesel majoritariamente localizadas e dispersas na Região Norte, como podemos observar na Figura 1.3. Sua produção representa aproximadamente 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país, o que equivale a 3.474,3 MW. Em contrapartida atende a uma área de aproximadamente 45% do território

nacional e a cerca de 3% da população nacional, ou seja, aproximadamente 1,2 milhões de consumidores em outubro de 2008 (ONS, 2008; BIG, 2008).

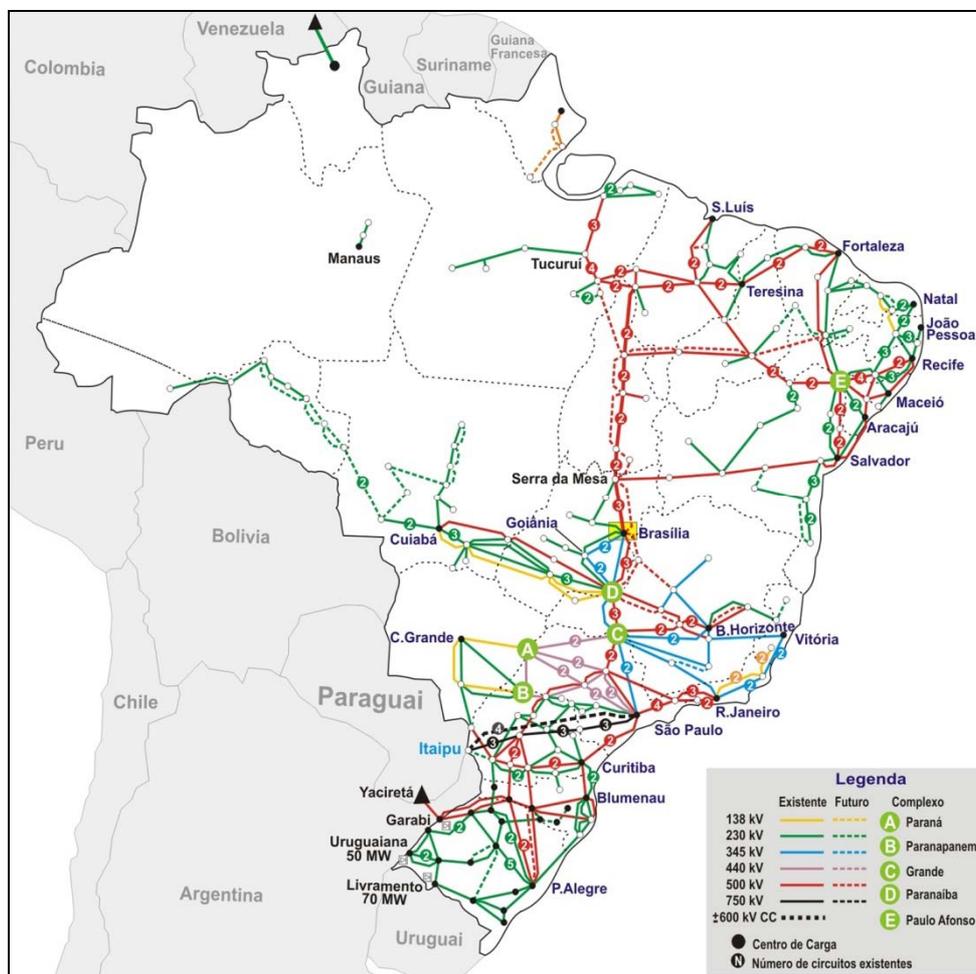


Figura 1.2 - Mapa do Sistema Interligado Nacional – horizonte 2007 / 2009.

Fonte: NOS (2008).

No Estado do Pará, Belém e parte do interior do Estado são atendidos pelo SIN. A outra grande parte do interior do Estado, como é o caso dos municípios da Ilha de Marajó, é atendida por Sistemas Isolados através de usinas termoelétricas à base de óleo diesel.



Figura 1.4 - Sistemas Isolados da Ilha de Marajó.

Fonte: Adaptada de Mapas Eletrográficos.

Normalmente o custo de eletrificação pela rede convencional é economicamente inviável em regiões com baixos níveis de ocupação ou de industrialização, como é o caso dos municípios da Ilha de Marajó. Essa limitação no abastecimento de energia constitui um dos principais entraves ao desenvolvimento e a melhoria da qualidade de vida dessas regiões. Uma vez que a geração termoelétrica, com base em combustíveis fósseis, deve ser rejeitada como base de incentivo ao desenvolvimento econômico, pelo seu grande impacto sobre o Aquecimento Global, a utilização de energia eólica torna-se uma opção atraente.

Assim, o objetivo do presente trabalho está centrado no estudo de viabilidade do emprego da geração de energia eólica na Ilha de Marajó. No item 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre estudos relacionados à energia eólica e o potencial eólico da Ilha de Marajó. O item 3 apresenta várias características da Ilha de Marajó. O item 4 refere-se aos dados e metodologia empregados no trabalho. O item 5 apresenta os resultados obtidos com a realização deste trabalho. Por fim, o item 6 apresenta as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Potencial Eólico Nacional

Por ter uma extensa costa litorânea, o país possui grande potencial de energia eólica ao longo de toda a costa litorânea durante o ano (Amarante et al., 2001; ANEEL, 2005) como mostram as Figura 2.1 (a) e (b).

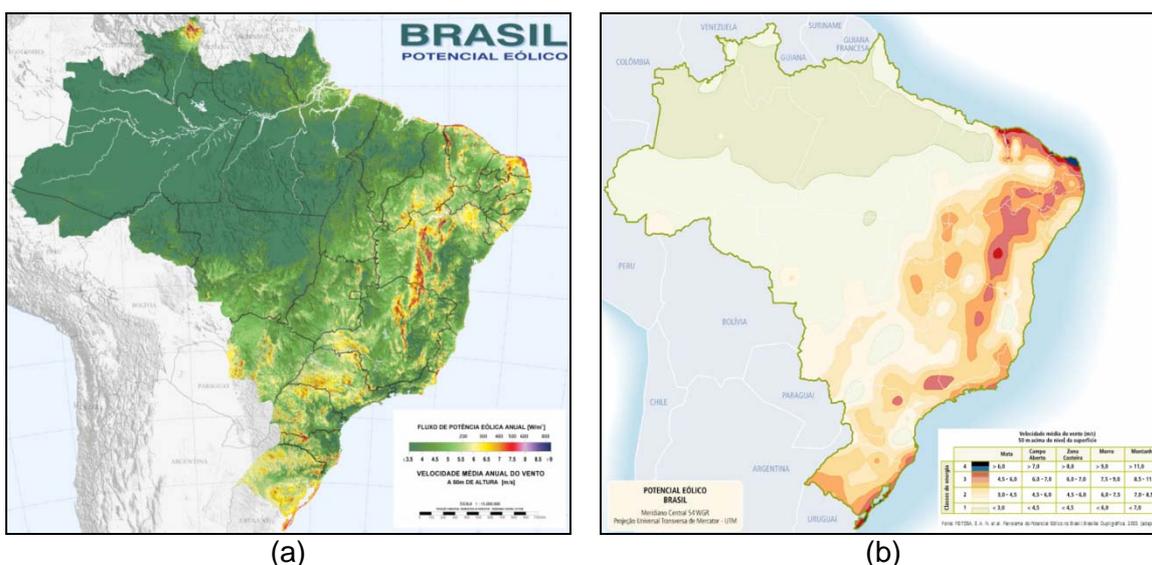


Figura 2.1 - Velocidade média anual do vento (m/s) a 50 m de altura para o Brasil.

Fonte: (a) Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Amarante et al., 2001) e (b) Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2ª Ed. (ANEEL, 2005).

Visualmente é possível identificar que existem concordâncias entre os dois mapas relacionadas às áreas de maior potencial eólico, como por exemplo as regiões nordeste e sul do Brasil. Entretanto, também existem discordâncias para algumas regiões como por exemplo a região norte do país, particularmente para a região que compreende a Ilha de Marajó.

A Figura 2.1 (a) foi obtida do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Amarante et al., 2001), elaborado com base no sistema comercial denominado MesoMap que é um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, de bases de dados meteorológicos e geográficos e de redes de computadores e sistemas de armazenamento. Seu desenvolvimento deu-se nos últimos três

anos, com suporte do NYSERDA - New York State Energy Research and Development Authority e DoE-US Department of Energy. O núcleo do Sistema MesoMap é o MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System), um modelo numérico de previsão de tempo similar a outros modelos de previsão de tempo, como Eta e MM5. Os dados utilizados foram provenientes principalmente de reanálises, ou seja, uma combinação entre observações (dados observados) e um modelo numérico da atmosfera (dados previstos no modelo) do US National Center for Atmospheric Research (NCAR), em intervalos de 6 horas e resolução horizontal baixa, de 200 km (equivalente a 2°), além de radiossondagens e temperaturas sobre a terra e os oceanos.

A Figura 2.1 (b) foi obtida do Capítulo 6 do Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2ª Edição que trata da Energia Eólica, baseado em Feitosa et al. (2003), no qual foi usado o Modelo Atmosférico de Mesoescala MM5, desenvolvido nos Estados Unidos pelo NCAR e Pennsylvania State University (PSU). Os dados utilizados foram provenientes do Projeto Reanálise / NCAR / NCEP, constituídos de séries temporais com todas as variáveis da atmosfera dos últimos 50 anos, a várias alturas e com um espaçamento de 2,5° por 2,5° de latitude e longitude (equivalente a 250 km).

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro apresenta um melhor nível de detalhamento e melhor resolução espacial desse potencial e, portanto, será empregado doravante como principal referência para o presente trabalho.

Segundo esse Atlas, a Zona Litorânea Norte-Nordeste Brasileira, que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte, possui ventos médios anuais entre 5 m/s e 7,5 m/s na parte norte dessa região (litorais do Amapá e Pará) e entre 6 m/s a 9 m/s em sua parte sul, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. A Figura 2.2 mostra, em destaque, o potencial eólico para a Ilha de Marajó obtido por esse mesmo Atlas.

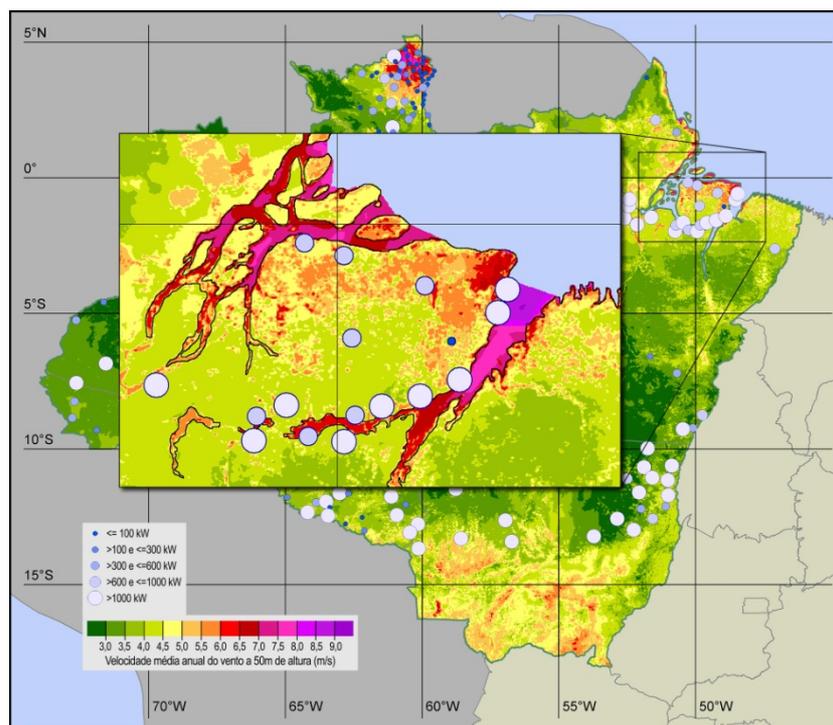


Figura 2.2 - Velocidade média anual do vento (m/s) a 50 m de altura para a Ilha de Marajó.

Fonte: Adaptada do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro para a região Norte (Amarante et al., 2001).

O Atlas indica que na região norte e nordeste da Ilha de Marajó, o vento médio anual a 50m de altura possui valores acima de 6 m/s e pode ser propício para ser utilizado na geração eólica de energia elétrica, particularmente nas regiões compreendidas pelos municípios de Soure, Salvaterra, Cachoeira do Arari, Chaves (localização, ver Figura 3.1) e outras localizados na região costeira da Ilha.

Ainda é possível verificar algum potencial também nas laterais da ilha, porém com uma magnitude bem menor. Isso ocorre devido à penetração dos alísios e das brisas terrestres e marinhas sobre os rios, os quais apresentam rugosidade baixa. Entretanto, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

Na região norte do Brasil, segundo Antônio Leite, pesquisador do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) que participou da elaboração do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro em entrevista dada ao portal Notícias da Amazônia, em 26 de agosto de 2008², “a maior probabilidade de aproveitamento do potencial eólico está na costa do Pará, pois em Roraima e no Amapá os ventos estão muito distantes das centrais de carga” e também dos grandes centros urbanos.

Silva e Rocha (2002) elaboraram um estudo de mapeamento eólico e de variabilidade do vento para a Ilha de Marajó, através do projeto Metodologias Integradas para o Mapeamento de Energias Alternativas no Estado do Pará (MEAPA).

No trabalho de mapeamento eólico, os autores concluíram que os recursos do vento são significativos na região nordeste da ilha, classificados como 7 numa escala de 0 a 10. Entretanto, na região noroeste os recursos de vento são baixos, classificados como 3 numa escala de 0 a 10. No restante da região os ventos são insuficientes para gerar energia. Um detalhe muito importante desse estudo é que o modelo usado nessa simulação é um tipo simplificado que se baseia apenas na rugosidade da superfície e no regime de vento em escala sinótica³, o qual deve ser aplicado somente em áreas onde a topografia não é importante. Logo, as informações de topografia e de efeito aerodinâmico (como possíveis obstáculos) foram desconsideradas.

² <<http://www.noticiasdaamazonia.com.br/4399-potencial-eolico-na-regiao-amazonica-pode-ter-aumentado-com-o-desmatamento/>>

³ Também conhecida como grande escala, abrange fenômenos meteorológicos que possuem escala espacial de aproximadamente 1.000 a 10.000 km e temporal de poucos dias, tais como ciclones e anticiclones, sistemas frontais, deslocamento de massas de ar, corrente de jato, sistemas de alta e baixa pressão, entre outros.

No trabalho de variabilidade do vento, os autores concluíram que ocorre uma predominância da direção do vento de nordeste e de leste para todos os sítios de estudo (Chaves, Soure, Fazenda Tapera, Anajás e Breves), sendo que os maiores valores de velocidade foram obtidos em Chaves, Fazenda Tapera e Soure. Os dados de vento utilizados no trabalho foram obtidos em um experimento de campo, com lançamentos de balão piloto, no período de 07 a 13 de maio de 1998 (período chuvoso na Ilha), de 3 em 3 horas totalizando 216 lançamentos. Por fim, os autores analisaram as informações apenas para as alturas de 24 m e 52 m.

Tanto os dados estimados de vento fornecidos pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro como o trabalho pioneiro de Silva e Rocha constituem base de informação importante, mas ainda insuficiente para a realização de estudos de viabilidade econômica dessa alternativa energética para a região. É necessário um estudo mais aprofundado, considerando um período mais longo. Ainda, os atuais aerogeradores de alta eficiência disponíveis no mercado são muito altos, o que exige estimativas do vento em níveis superiores a 50 m.

Existem hoje dois sistemas híbridos, com geração eólica de pequeno porte, na Ilha de Marajó, segundo Barbosa et al. (2004). Porém, atualmente eles encontram-se inoperantes devido à falta de manutenção e a outros fatores referentes à operação e gestão dos mesmos. Um deles foi instalado no município de Salvaterra (localização, ver Figura 3.1), na comunidade de Joanes, composto por 4 aerogeradores de 10 kW (cada) e um arranjo fotovoltaico de 10,2 kWp, com módulos de 55 Wp. O outro foi instalado no município de Ponta de Pedras (localização, ver Figura 3.1), na comunidade de Praia Grande, é composto por um aerogerador de 10 kW e 2 grupos de geradores a diesel de 7,5 kVA (cada).

No presente trabalho buscou-se utilizar um modelo que assimilasse melhor as características regionais do Brasil, como rugosidade, relevo e topografia. Além disso, empregou-se uma melhor resolução horizontal para se obter

informações de vento mais detalhadas em relação aos trabalhos já existentes de forma a incentivar possíveis investidores nos estudos de viabilidade de implantação da geração eólica na Ilha de Marajó.

3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Características Gerais da Ilha de Marajó

Segundo o relatório de Estatística Municipal, elaborado pela Secretaria Executiva de Planejamento, Orçamento e Finanças (SEPOF) (PARÁ, 2006), com base nos dados do IBGE (2004), a Ilha do Marajó é um conjunto de ilhas fluviais na Região Norte do Brasil, na foz do rio Amazonas, localizada entre as latitudes 02°30' S e 01°00' N; longitudes 47°30' W e 52°00' W; com área total de 104.141,5 km² e 412.134 habitantes, com uma densidade populacional de 3,96 habitantes por km², sendo a população urbana correspondente a 38,66% do total e a população que habita o meio rural, 61,34%. Ainda, segundo a SEPOF, a ilha é dividida em 16 municípios distribuídos em três microrregiões, como mostra a Figura 3.1.

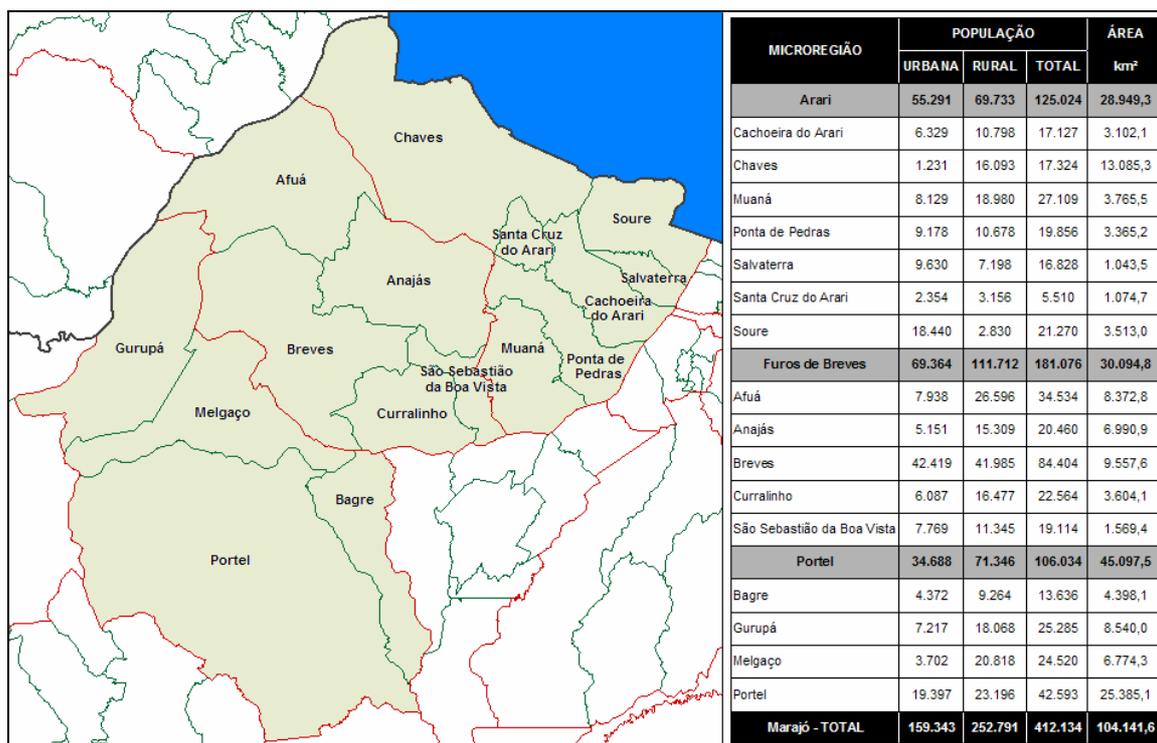


Figura 3.1 - População por classe e área (km²) da Ilha de Marajó.

Fonte: Adaptada de PARÁ (2006); IBGE (2004).

3.2 Relevo da Ilha de Marajó

Segundo o relatório de Estatística Municipal, SEPOF (PARÁ, 2006), com base nos dados do IBGE (2004), todas as três microrregiões inserem-se, morfo-estruturalmente, na unidade do Planalto Rebaixado da Amazônia (do Baixo Amazonas), com uma pequena variação para a Planície Amazônica. Todos os municípios possuem relevo aplainado com cotas baixas, de no máximo 20m. Especialmente nos municípios de Soure (com cota máxima de 5m), Afuá (com cota máxima de 4m) e Portel (com cota máxima de 3m a 4m).

3.3 Vegetação da Ilha de Marajó

Segundo o relatório de Estatística Municipal, SEPOF (PARÁ, 2006), com base nos dados do IBGE (2004), na microrregião do Arari predominam as vegetações Floresta Densa de Terra Firme, Campos Cerrados, Campos Altos e Campos Baixos. Já às margens dos baixos cursos d'água, destaca-se a Floresta Aberta Mista, nas várzeas sujeitas a inundações das marés, onde ocorre, também, o Manguezal. Devido à prática da agricultura migratória, nos tratos de Floresta Densa, podem ser observadas manchas de Floresta Secundária, onde os cultivos foram abandonados.

Na microrregião Furo de Breves é dominante a vegetação de florestas de várzea, com presença de espécies latifoliadas (folhas largas), como a virola, a andiroba, o anani, a pracuúba entre outras, intercaladas por palmeiras, como o açaí, o miriti, o babaçu e o murumuru. Também há presença de Floresta Densa, de planície aluvial sub-região dos furos de Marajó, representativa da fisionomia florística da porção ocidental da ilha de Marajó. Entretanto, vale mencionar que as áreas Leste e Norte apresentam campos naturais, característicos da “região dos campos de Marajó”, na parte Leste da ilha. A produção agrícola nas várzeas, também, foi muito importante em certa época para a economia do Município, principalmente no cultivo do arroz, estando, hoje, praticamente abandonada. Os locais dos antigos cultivos foram ocupados pelas capoeiras ou Florestas Secundárias.

Na microrregião de Portel, a cobertura vegetal é representada pela Floresta Densa dos baixos platôs. Ao longo da margem do rio Pará e do baixo curso dos seus afluentes, encontra-se a Floresta Densa da planície aluvial, com intensa presença de palmeiras, principalmente do açazeiro, da floresta ciliar, ocupando os terraços. Onde a cobertura vegetal primária foi removida pela ação dos agricultores, surge a Floresta Secundária, em diversos estágios de regeneração. Pequenas formações campestres são encontradas nas áreas mais deprimidas, sujeitas a inundações pela ação das chuvas.

3.4 Clima da Ilha de Marajó

Segundo o relatório de Estatística Municipal, SEPOF (PARÁ, 2006), com base nos dados do IBGE (2004), as características climáticas da Ilha de Marajó são muito parecidas nas três microrregiões. Em ambas, segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN e GEIGER, 1928), o clima corresponde ao tipo Am (clima tropical monçônico), com temperatura média do ar em torno de 27 °C, mínima superior a 18 °C e máxima de 36 °C, sendo que a amplitude térmica não ultrapassa 5 °C e a umidade relativa sempre acima de 80%. Entretanto, na microrregião de Portel, a classificação climática sofre ligeira variação para o tipo Aw (clima tropical de chuvas no verão, com inverno seco e chuvas máximas de verão) e Af (clima equatorial úmido, que apresenta chuvas bem distribuídas ao longo do ano). A temperatura do ar é amenizada devido aos alísios e as brisas.

Apresenta alta precipitação pluviométrica durante o ano, em média de 2.200 mm/ano, devido à convergência dos alísios e brisas. Possui um período, de curta duração, com menor pluviosidade entre agosto e novembro (com precipitação média inferior a 60 mm) e um período chuvoso de longa duração, entre dezembro e julho. Abril é o mês considerado como o de maior pluviosidade, chegando a registrar 441 mm e novembro o menos chuvoso, no qual já se registraram apenas 9 mm (PARÁ, 2006).

Ainda segundo o mesmo relatório, os ventos na região foram considerados fortes, vindos de nordeste, com destaque para o município de Muaná onde consta um valor médio estranho de 21 m/s. Tal intensidade de vento reportada além de inconsistente com o que se observa para essa região, é muito elevada. Acreditamos que o valor deve ser 2,1 m/s.

De acordo com a climatologia de vento da estação meteorologia de Soure (localização, ver Figura 3.1), a velocidade média anual do vento é de 2,4 m/s e a direção predominante é de nordeste, ambos a 10 metros de altura, como pode ser visto na Figura 3.2.

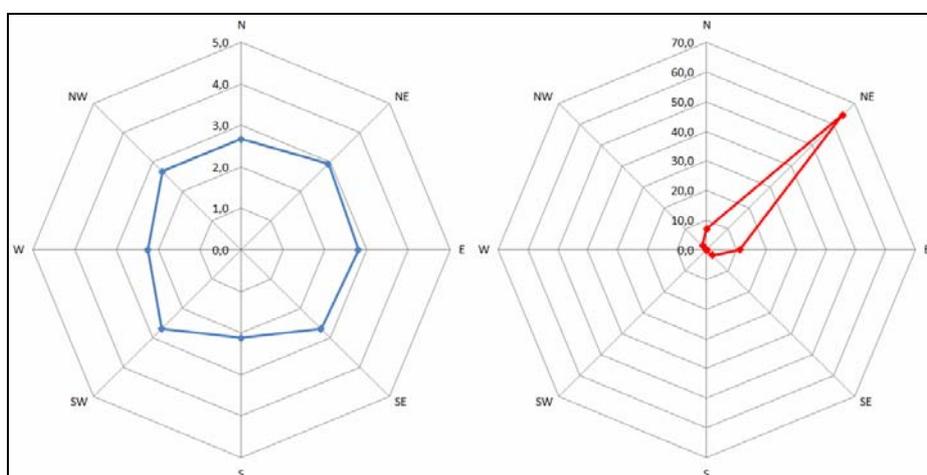


Figura 3.2 – Velocidade (m/s) e freqüência (%) média anual do vento por direção.

Os principais sistemas meteorológicos que atuam na região e influenciam no regime de vento basicamente são Célula de Hadley, Célula de Walker, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), massas de ar, ventos alísios, brisas, Linhas de Instabilidade, Jatos de Baixos Níveis.

A Célula de Hadley ocorre nas baixas latitudes, próximo ao equador força o movimento do ar ascender verticalmente por convergência do escoamento da região Oe por aquecimento do ar à superfície, e descender próximo das médias latitudes. O sentido da circulação é no sentido do equador na superfície e no sentido dos pólos em altos níveis. Esta circulação provoca convecção de

grande escala no equador, formando a ZCIT, onde predomina o clima tropical e subtropical.

A ZCIT é uma região de baixas pressões próximo ao equador onde ocorre a convergência (em baixos níveis) dos ventos alísios de sudeste e de nordeste, que partem dos centros de alta pressão subtropicais.

Existe também nas baixas latitudes, além da circulação meridional da Célula de Hadley, uma circulação zonal denominada Célula de Walker. Ela é atribuída basicamente à diferença de temperatura na superfície entre os continentes e oceanos e a direção da circulação é leste-oeste. Ela sofre alterações devido às mudanças na temperatura da superfície do mar principalmente no Pacífico.

As massas de ar que atuam na região são: tropical marítima (mT), formada sobre o Atlântico Tropical, originada na Alta Subtropical (centro de alta pressão) do Atlântico Sul e também no Norte, sendo suprida de calor e umidade por baixo, associada aos ventos que sopram de nordeste (verão) e a sudeste (no inverno) sobre a costa leste da Região Norte e Nordeste do Brasil; tropical continental (cT), formada sobre o continente, próximo da região centro-oeste, composta de ar quente e seco, provoca o “bloqueio atmosférico” que impede o deslocamento de frentes frias para latitudes mais baixas e a formação de nuvens convectivas profundas responsáveis por chuvas e ventos fortes e turbulentos; equatorial continental (cE), originada na Amazônia central, composta de ar quente e úmido, tem atuação constante na região norte, provocando instabilidade e convecção.

Com relação a circulação local (ou de pequena escala), que ocorre na região norte, podemos citar as brisas. Elas são fluxos de vento que ocorrem devido o aquecimento e o resfriamento diferencial que se estabelecem entre a terra e a água. Na região Norte isto ocorre pela grande área continental (floresta amazônica) e rios de grande extensão. Durante o dia existe um escoamento no sentido da rio/continente em baixos níveis e o oposto em altos níveis. Durante a noite o escoamento ocorre no sentido continente/rio em baixos níveis e o

oposto em altos níveis. Segundo Cohen et al (2006), há uma canalização da brisa, ou seja, uma canalização do vento horizontal, com valor de 11m/s na altura de aproximadamente 200 metros.

Outro sistema de pequena escala que afeta o regime de vento no norte são as Linhas de Instabilidade ou Linhas de Convecção. Elas se formam sobre o oceano, próximas ao litoral, devido à brisa, podendo se propagar para o interior do continente. Estas linhas ocorrem associadas à ZCIT, sendo que no verão e outono desenvolvem-se mais ao sul do equador; no inverno e primavera, mais ao norte do equador; são inibidas por subsidência de grande escala (ENOS⁴). Seu aumento pode ocorrer por pulsos devido à intensificação dos alísios; frentes que se aproximam do equador favorecem sua formação; sua propagação depende da presença de forte cisalhamento vertical entre alísios e jatos de baixos níveis, o que forma um duto no qual as linhas se propagam como ondas de gravidade.

Na região norte também são observados os Jatos de Baixos Níveis (JBN). Eles têm sua formação associada à circulação de brisa marítima, ao longo da costa atlântica da Amazônia. Nos horários da tarde a intensificação do vento ao longo da costa atlântica está associada à circulação de brisa marítima. Entretanto, esse centro de máxima velocidade do vento penetra para o interior do continente (COHEN et al., 2006). (recomendação consensual da banca)

⁴ O ENOS, ou El Niño Oscilação Sul, representa de forma mais genérica um fenômeno de interação atmosfera-oceano, associado a alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e no Pacífico oeste próximo à Austrália.

3.5 Economia da Ilha de Marajó

Segundo o relatório de Estatística Municipal, SEPOF (PARÁ, 2006), com base nos dados do IBGE (2004), a economia de todas as três microrregiões baseia-se na agricultura, pecuária e extração vegetal. Ainda existe uma pequena parcela representada por indústrias de beneficiamento (da produção animal e vegetal) e pela produção de artesanato marajoara.

A agricultura gira em torno de lavouras temporárias, com produção de abacaxi, arroz, feijão, mandioca e milho, além de lavouras permanentes, com produção de banana, laranja, coco-da-baía.

A pecuária gira em torno da criação de bovinos, suínos, bubalinos, eqüinos, asininos, muares, ovinos, caprinos e aves, além da geração de produtos de origem animal como o leite de vaca, ovos de galinha e de codorna e mel de abelha.

A extração vegetal gira em torno da geração de produtos alimentícios como o açaí (fruto), a castanha de caju, a castanha do Pará, o palmito e a mangaba; de madeireiros como o carvão vegetal, lenha e madeira em tora; de borrachas como o látex coagulado e látex líquido; de tanantes e de gomas não elásticas como a maçaranduba.

3.6 Acesso à Ilha de Marajó

O acesso a Ilha de Marajó é feito por avião, barco ou balsa, sendo que o interior da ilha, conta com poucas vias rodoviárias, como pode ser visto na Figura 3.3.

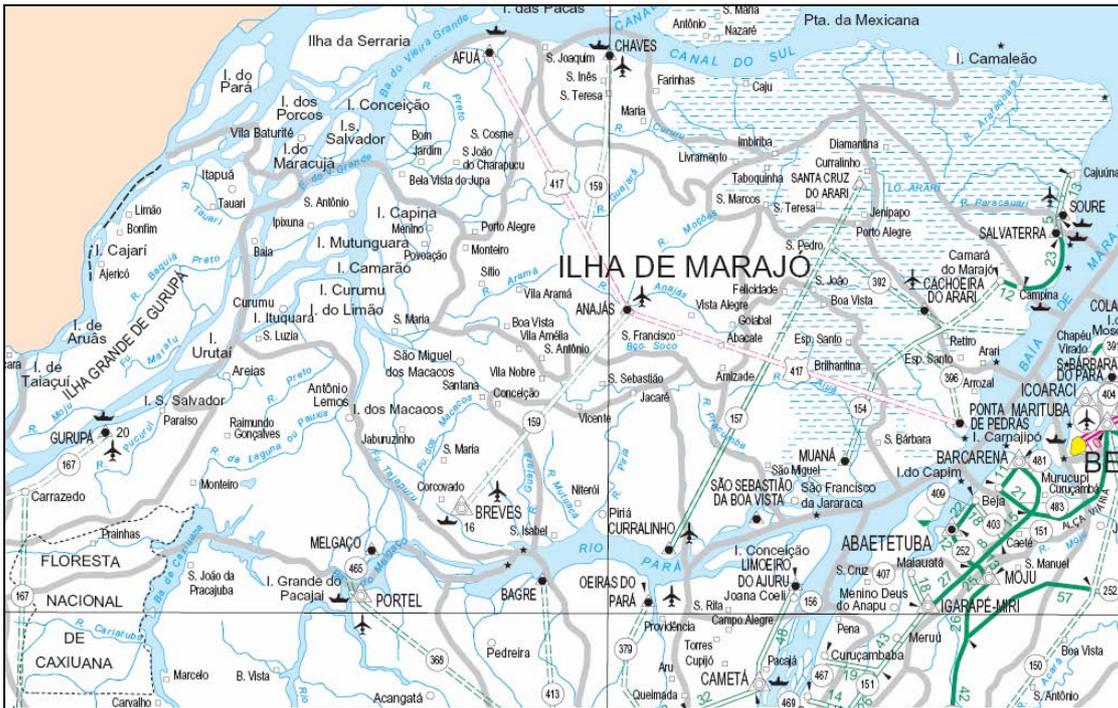


Figura 3.3 - Vias de acesso para a Ilha de Marajó: aeroportos, portos e estradas.

Fonte: Mapa Rodoviário do Pará – DNIT.

Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/menu/rodovias/mapas>

3.7 Aspectos Energéticos da Ilha de Marajó

A Ilha de Marajó é servida pelo Sistema Isolado, através de Usinas Termelétricas de Energia (UTE) exclusivamente a óleo Diesel, como mostra a Tabela 3.1 e os dados do número de domicílios com energia elétrica são mostrados na Figura 3.4.

Tabela 3.1 - Usinas UTE em Operação na Ilha de Marajó.

Município	Potência Nominal (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Demanda 2007 (kW)	Destino da Energia	Proprietário
Arari	11.283,00	11.077,60	8.326	–	–
Cachoeira do Arari	1.050,00	1.008,00	699	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Chaves	584,00	584,00	254	SP	100% para Centrais Elétricas do Pará S.A.
Muaná	1.190,00	1.163,20	930	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Ponta de Pedras	1.540,00	1.499,20	1.180	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Salvaterra	2.677,00	2.632,80	2.368	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Santa Cruz do Arari	720,00	720,00	405	SP	100% para Centrais Elétricas do Pará S.A.
Soure	3.522,00	3.470,40	2.490	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Furos de Breves	14.027,00	13.938,20	8.481	–	–
Afuá	1.690,00	1.675,20	1.120	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Anajás	1.112,00	1.112,00	609	SP	100% para Centrais Elétricas do Pará S.A.
Breves	8.760,00	8.700,80	5.275	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Curralinho	1.415,00	1.442,20	757	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
São Sebastião da Boa Vista	1.050,00	1.008,00	720	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Portel	7.896,00	6.895,60	5.169	–	–
Bagre	1.222,00	1.222,00	664	SP	100% para Centrais Elétricas do Pará S.A.
Gurupá	1.574,00	1.603,20	1.313	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Melgaço	720,00	720,00	377	SP	100% para Centrais Elétricas do Pará S.A.
Portel	4.380,00	3.350,40	2.815	PIE	100% para Guascor do Brasil Ltda.
Marajó - TOTAL	33.206,00	31.911,40	21.976	–	–

Fonte: Elaboração própria com base em dados da GTON /ELETROBRÁS, 2007 / BIG.

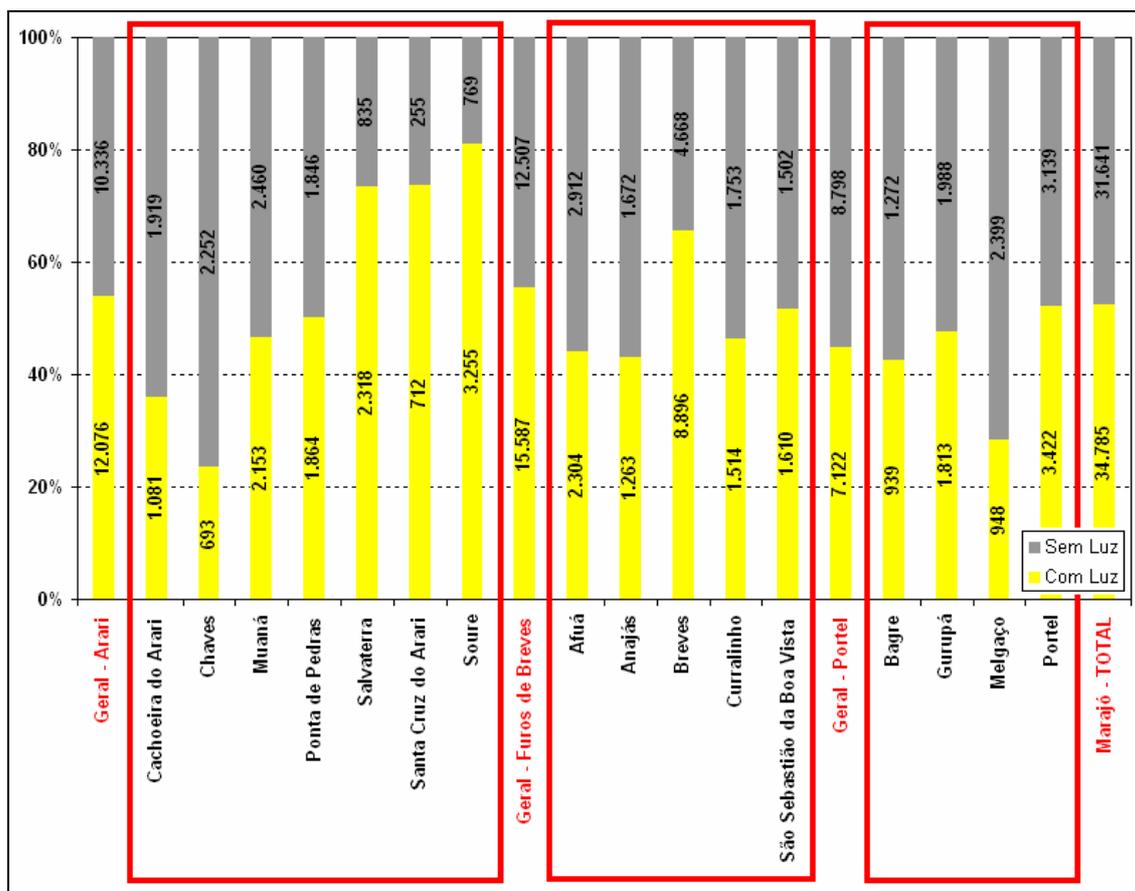


Figura 3.4 - Número de domicílios com e sem energia elétrica na Ilha de Marajó.

Fonte: IBGE (2000).

Como se pode verificar, existem 66.426 domicílios na região da ilha. Destes, 34.785 possuem energia elétrica, ou seja, 52,4% dos domicílios. Ainda, o município com a maior porcentagem de domicílios com eletricidade é Soure com 80,9% (3.255 domicílios) e com menor é Chaves com 23,5% (693 domicílios). Já o município com o maior número de domicílios com eletricidade é Breves com 8.896 domicílios (65,6%) e com o menor também é Chaves com 693 domicílios (23,5%). Esse gráfico é muito interessante pois mostra uma proporção muito baixa da taxa de eletrificação nesses municípios.

Os dados estatísticos de número de consumidores e consumo de energia elétrica são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Número de Consumidores e Consumo (kWh) na Ilha de Marajó.

MUNICÍPIO	RESIDENCIAL		COMERCIAL		INDUSTRIAL		OUTROS		TOTAL	
	Nº	(kWh)	Nº	(kWh)	Nº	(kWh)	Nº	(kWh)	Nº	(kWh)
Arari	22.934	24.147.126	2.208	5.695.309	19	2.070.932	579	13.731.704	25.740	45.645.071
Cachoeira do Arari	9.617	10.987.214	936	2.484.133	-	-	272	5.674.276	10.825	19.145.623
Chaves	307	311.731	48	77.965	1	1.408	24	179.259	380	570.363
Muaná	1.787	1.762.140	210	365.272	9	95.228	42	1.079.975	2.048	3.302.615
Ponta de Pedras	2.280	2.377.638	308	517.889	1	319	46	1.324.840	2.635	4.220.686
Salvaterra	3.795	3.465.468	318	929.786	4	762.254	103	2.214.653	4.220	7.372.161
Santa Cruz do Arari	837	670.125	59	115.186	3	5.722	31	274.805	930	1.065.838
Soure	4.311	4.572.810	329	1.205.078	1	1.206.001	61	2.983.896	4.702	9.967.785
Furos de Breves	13.211	17.309.487	1.392	5.004.513	14	624.216	265	10.545.993	14.882	33.484.209
Afuá	1.561	2.194.277	122	419.160	3	21.878	41	990.851	1.727	3.626.166
Anajás	1.154	1.269.606	200	352.399	3	22.597	35	323.681	1.392	1.968.283
Breves	7.705	10.818.828	752	3.580.836	6	304.758	121	7.054.863	8.584	21.759.285
Curralinho	1.239	1.348.428	144	243.320	1	5.012	33	1.097.159	1.417	2.693.919
São Sebastião da Boa Vista	1.552	1.678.348	174	408.798	1	269.971	35	1.079.439	1.762	3.436.556
Portel	6.367	8.543.179	813	2.351.336	11	3.834.507	171	4.153.805	7.362	18.882.827
Bagre	910	987.584	99	221.230	5	179.614	38	338.541	1.052	1.726.969
Gurupá	1.258	1.419.838	248	459.545	2	5.665	44	952.305	1.552	2.837.353
Melgaço	712	805.839	85	137.993	-	-	30	379.814	827	1.323.646
Portel	3.487	5.329.918	381	1.532.568	4	3.649.228	59	2.483.145	3.931	12.994.859
Marajó - TOTAL	42.512	49.999.792	4.413	13.051.158	44	6.529.655	1.015	28.431.502	47.984	98.012.107

Fonte: Elaboração própria com base em SEPOF (PARÁ, 2006); IBGE 2004.

Como se pode verificar, existem apenas 47.984 consumidores de energia, entre as classes Residencial, Comercial, Industrial e Outros, correspondendo a uma demanda anual de 98.012.107 kWh ou aproximadamente 98 GWh.

O consumo de Energia Elétrica por setor é representado na Figura 3.5. Nela podemos verificar o contraste entre consumo nacional e da ilha, como por exemplo o baixo índice de indústrias instaladas na região. No total são 44 indústrias e uma demanda de 6.529.655 kWh de energia pelo setor. Alguns municípios possuem apenas uma indústria, como é o caso de 5 dos 16 deles. Muaná é o município com o maior número de indústrias, possui 9 que correspondem a um consumo de 95.228 kWh. Portel possui 4 indústrias que

correspondem a um consumo de 3.649.228 kWh. Soure possui apenas uma, mas só ela demanda 1.206.001 kWh de energia. Para maiores detalhes sobre os setores de consumo, ver ANEXO I.

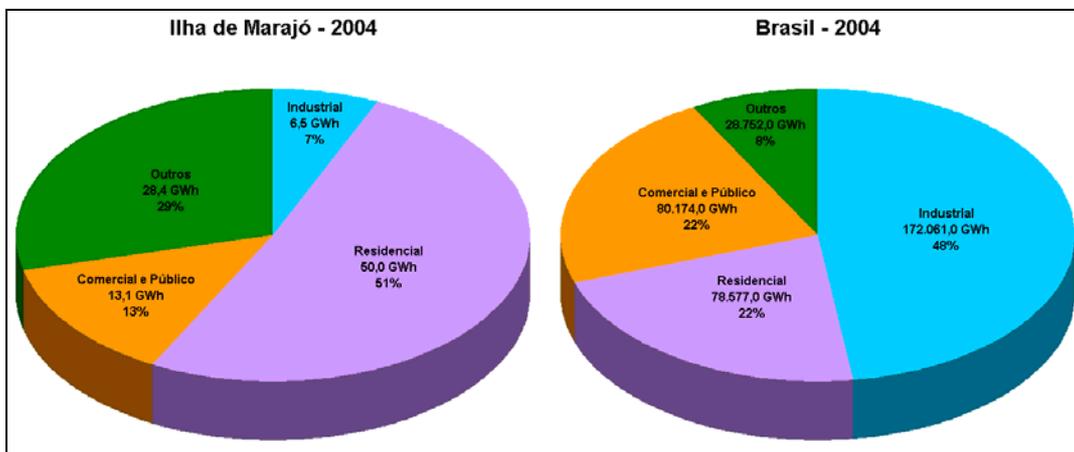


Figura 3.5 - Consumo de Energia Elétrica por Setor - Ilha de Marajó x Brasil.

Fonte: Elaboração própria com base em GTON/ELETROBRÁS (2006) / SEPOF (PARÁ, 2006); IBGE (2004); REDE CELPA (Web Site).

4 DADOS E METODOLOGIA

4.1 Dados

Os dados observados de vento na superfície foram obtidos de mensagens METAR (METeorological Aviation Report) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), através do Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I), para as Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) dos aeroportos de Belém (SBBE) e Macapá (SBMQ), conforme a Figura 4.1. Neles, o vento é medido a 10 m de altura, de hora em hora, com média dos últimos 10 minutos. O período disponibilizado foi a partir das 0000 UTC de 1 de janeiro de 2004 até as 2300 UTC 31 de dezembro de 2006.

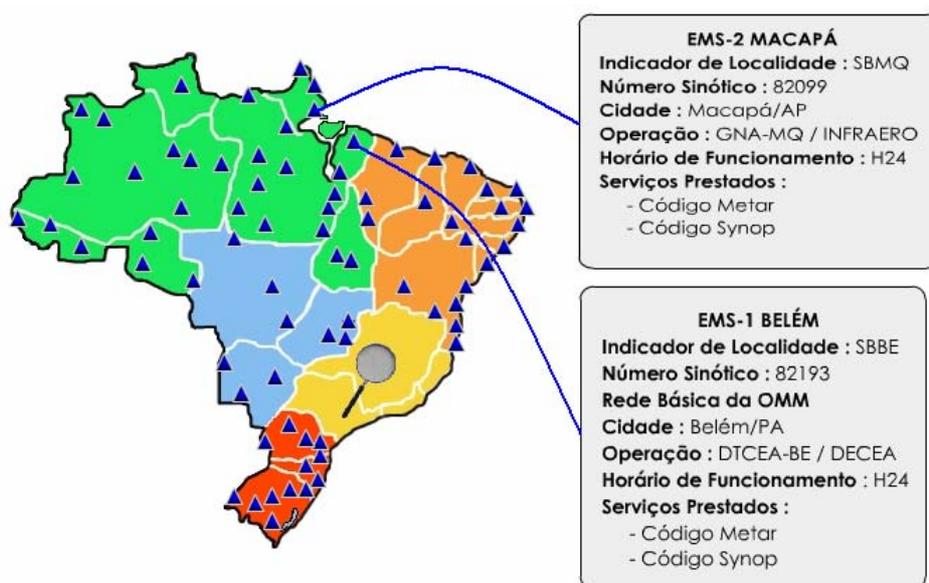


Figura 4.1 - Estações da rede do DECEA.

É importante esclarecer aqui que o DECEA tem como norma não fornecer os “dados brutos”, como é o caso das mensagens METAR. Houve uma exceção para este trabalho, com o compromisso de não divulgar os dados a terceiros e disponibilizar uma cópia da dissertação a Aeronáutica. Os dados normalmente fornecidos pelo DECEA aos usuários podem ser obtidos apenas na forma de

médias e estatísticas sendo, portanto, de pouco valor para trabalhos de validação de modelos de previsão e para estudos de potenciais eólicos.

Os dados de população urbana e rural, área territorial, número de domicílios com energia elétrica, número de consumidores e consumo de energia elétrica foram obtidos pelo IBGE, segundo o CENSO elaborado em 2000 e outros em 2004, divulgados pela Secretaria Executiva de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças (SEPOF) do Estado do Pará, no relatório de Estatística Municipal de 2006.

Os dados de consumo de óleo Diesel para os sistemas isolados da Ilha do Marajó foram fornecidos pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás), a partir dos relatórios de planejamento e operação dos sistemas isolados.

4.2 O Modelo Eta

Para a execução deste estudo foi utilizado o modelo regional Eta (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994), o qual foi desenvolvido na Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia.

Os modelos regionais se propõem a prever com maiores detalhes os fenômenos meteorológicos, bem como seus principais elementos como temperatura, precipitação e vento. No CPTEC, o Eta faz previsões operacionais que cobrem a maior parte da América do Sul, com resolução horizontal de 40 km e atualmente também de 20 km.

O Eta é um modelo de área limitada e utiliza a coordenada vertical η (eta), que reduz os erros que ocorrem nos cálculos de variáveis obtidas a partir de derivadas horizontais ao longo de uma superfície. Essa coordenada é fundamentada na normalização da pressão com a vantagem de que nesta coordenada as superfícies constantes estão dispostas quase na horizontal tanto nas áreas planas quanto nas montanhosas. Matematicamente a coordenada η (sigma) é definida por:

$$\eta = \left(\frac{p - p_T}{p_s - p_T} \right) \left[\frac{p_{ref}(z) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \right] \quad (4.1)$$

Onde, p_T é a pressão no topo do modelo; p_s e z são a pressão e a elevação da fronteira inferior do modelo, respectivamente; p_{ref} é a pressão de referência. O primeiro termo do lado direito da expressão (4.1) é a definição padrão da coordenada sigma e o segundo é o termo de conversão da coordenada vertical σ em η .

Na Figura 4.2, é apresentada a configuração da estrutura vertical do modelo Eta com 38 e 50 camadas na vertical, lembrando que para este trabalho usou-se 38 camadas. A pressão no lado esquerdo indica as posições das camadas de acordo com a altura.

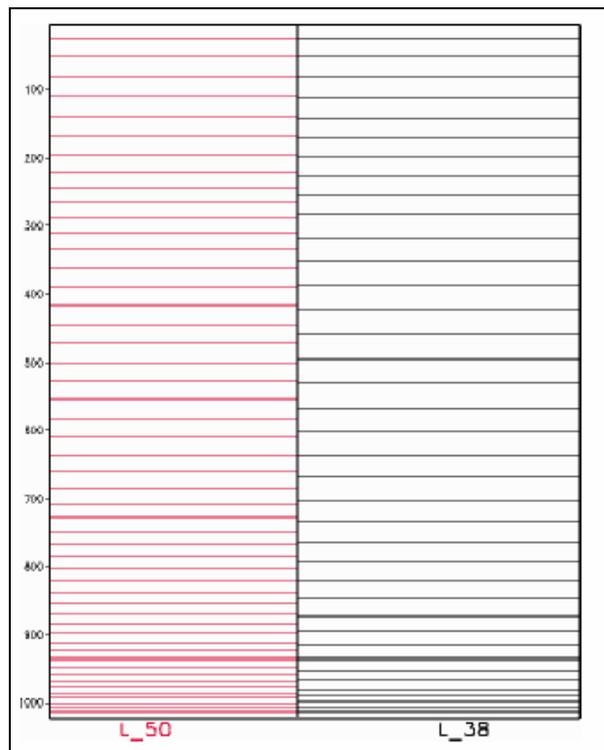


Figura 4.2 - Distribuição vertical e espessura das camadas atmosféricas representadas no modelo Eta com 50 (linhas vermelhas) e 38 níveis (linhas pretas).

As variáveis do modelo são distribuídas de acordo com a “Grade-E” de Arakawa (ARAKAWA; LAMB, 1977), conforme a Figura 4.3. Essa grade é definida sobre um sistema de coordenadas de latitude e longitude que sofreu uma rotação, onde o ângulo de rotação para o novo sistema de coordenadas é o ângulo formado entre o equador e a reta que liga o centro do domínio do modelo ao meridiano de 0° . Os pontos de massa e de velocidade são determinados na camada intermediária entre dois níveis enquanto que a velocidade vertical é determinada nas interfaces. Cada ponto h representa um ponto de uma variável de massa, tal como temperatura ou umidade, enquanto que cada ponto v representa as componentes horizontais do vento. A distância d é o espaçamento entre dois pontos de h ou v adjacentes, e a magnitude desta distância define a resolução horizontal do modelo. Os valores de Δx e Δy são os incrementos da grade no sistema de coordenadas de latitude e longitude rotacionadas.

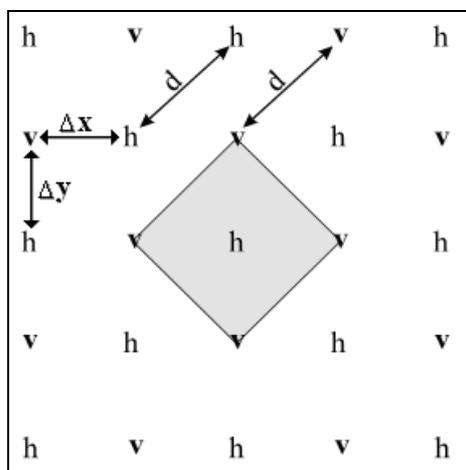


Figura 4.3 - “Grade-E” de Arakawa

Fonte: BLACK (1994).

A topografia é representada por degraus discretos cujos topos coincidem exatamente com as interfaces das camadas do modelo. A Figura 4.4, mostra uma seção vertical onde a topografia e as superfícies η são representadas. As variáveis de massa e do vento horizontal são distribuídas no meio das

camadas, enquanto que a velocidade vertical e energia cinética turbulenta são representadas nas interfaces das camadas. Os pontos de ventos que estão situados nos vértices de cada degrau são considerados como zero.

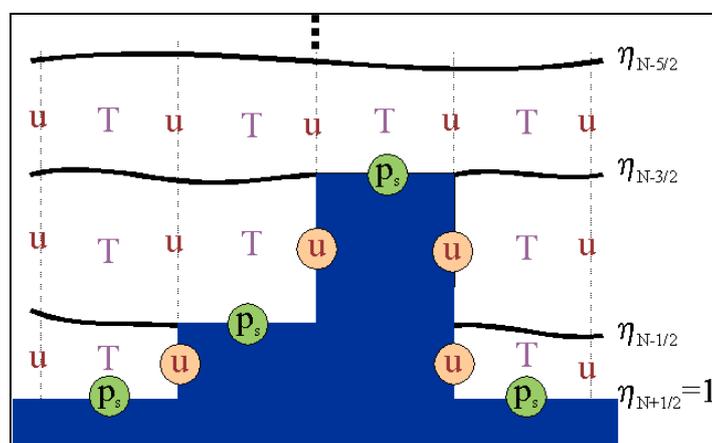


Figura 4.4 - Seção vertical idealizado da topografia do modelo Eta e distribuição das variáveis na vertical (u , T , P_s).

Neste trabalho, as características e os ajustes do modelo foram os seguintes:

- Resolução e grade horizontal: com 8 x 8 km, variáveis distribuídas em ponto de grade “Grade-E” de Arakawa;
- passo temporal = 15 seg.;
- Número de pontos: 121 (na direção y) x 181 (em x) x 38 níveis (ver Figura 4.5);
- Ponto central: 49,5° W e 0,5° S;
- Equilíbrio hidrostático;
- Coordenada vertical: Eta (MESINGER, 1984);
- Topo do modelo: 50 hPa;
- Variáveis prognósticas: temperatura (T), umidade (q), vento horizontal (u), pressão à superfície (p_s), energia cinética turbulenta (TKE), umidade e temperatura do solo e hidrometeoros (água líquida ou gelo) das nuvens;
- Ajuste às ondas de gravidade: esquema ‘forward-backward’ modificado por Janjić (1979);
- Convecção: esquema Betts-Miller-Janjić (JANJIĆ, 1994);

- Microfísica de nuvens: esquema Ferrier (2002) para chuva e as nuvens estratiformes;
- Camada Limite:
 - Trocas turbulentas na vertical: Mellor-Yamada 2.5 (MELLOR-YAMADA, 1982);
- Camada Limite Superficial:
 - Trocas de energia na superfície: teoria da similaridade de Monin-Obukhov (MONIN; OBUKHOV 1954);
 - Funções de estabilidade: Paulson functions;
- Radiação: esquema GFDL, tendências atualizadas a cada hora, inclui tratamento para radiação de onda curta (LACIS e HANSEN, 1974) e onda longa (FELS e SCHWARZKOPF, 1975);
- Esquema de superfície: esquema de NOAH (MITCHELL, 2001; CHEN e DUDHIA, 2001), 4 camadas de solo;
- Condições iniciais e de contorno lateral: Eta 40 km;
- Albedo inicial: climatologia sazonal;
- Dióxido de carbono: climatologia sazonal;
- Ozônio: climatologia sazonal;
- Umidade do Solo inicial: climatologia mensal;
- TSM: diária;
- Topografia (USGS⁵) e vegetação (ProVeg⁶): dados de entrada de 1 km de resolução, depois passam para a resolução do modelo (ver Figura 4.5);
- Simulações: no modo previsão, rodadas para 36 horas, com saídas de hora em hora, sempre inicializadas diariamente às 0000 UTC, sendo as primeiras 12 horas usadas para o modelo se ajustar.

⁵ United States Geological Survey, principal organização cartográfica dos Estados Unidos.

⁶ Projeto cujo objetivo é atualizar a representação da vegetação em todos os modelos numéricos em uso no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

- Rodado no super SX6 com 4 processadores;
- Período: 0000 UTC de 1 de dezembro de 2004 a 2300 UTC de 31 de novembro de 2006, total de 24 meses, dois ciclos sazonais completos;

O período das rodadas (dez/2004 a nov/2006), foi escolhido para se ter dois ciclos sazonais completos para estudo. Além disso, era desejável que o período estudado fosse mais recente. Por fim, de acordo com as anomalias de TSM do Oceano Atlântico, na região próxima a Ilha de Marajó, foi possível identificar que o ciclo de dezembro de 2004 a novembro de 2005 correspondia a um período no qual foram observadas anomalias positivas de TSM e que o ciclo de dezembro de 2005 a novembro de 2006 correspondia a um período no qual não foram observadas anomalias significantes. Assim, o primeiro período representa um ciclo sazonal atípico e, o segundo, um ciclo sazonal típico para o regime de vento na região de estudo.

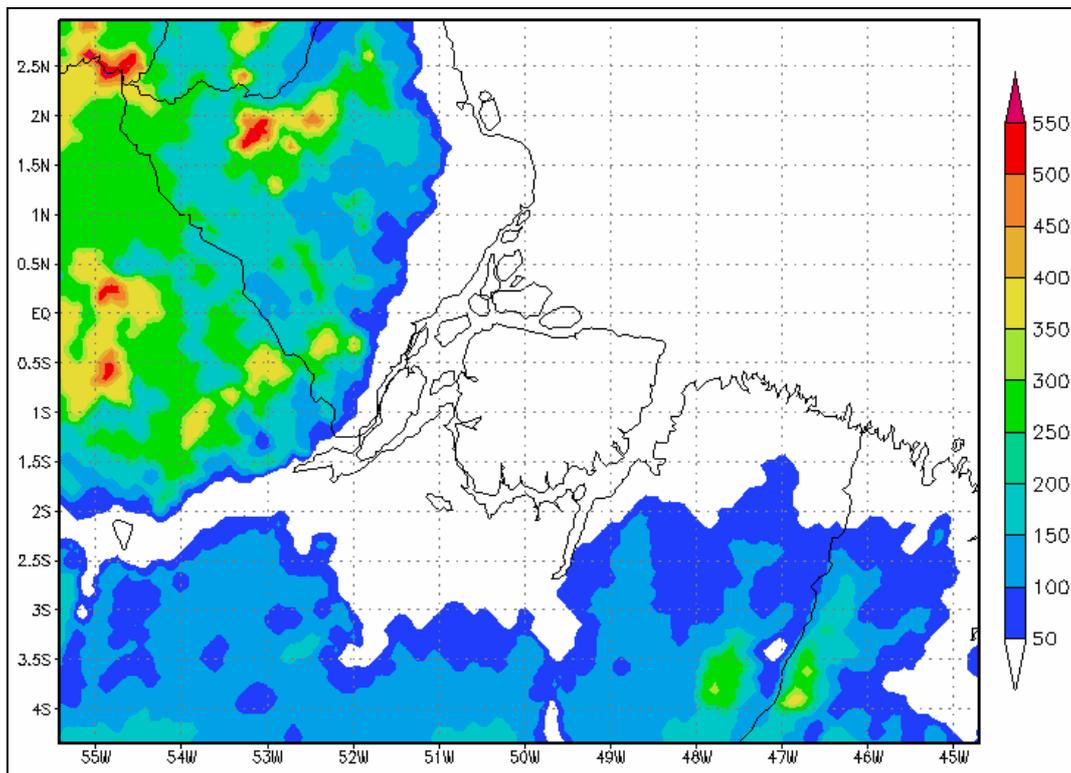


Figura 4.5 - Domínio das rodadas do Eta com topografia em metros.

Hoje em dia, a maioria dos modelos que rodam operacionalmente usa a aproximação hidrostática. Ela desconsidera a aceleração vertical, pois a magnitude desta é muito menor do que a magnitude da força do gradiente de pressão. Logo, para o caso do modo não-hidrostático, os efeitos da aceleração vertical são considerados. A vantagem do uso da aproximação hidrostática é a economia computacional e tempo de processamento.

Os modelos calculam os movimentos atmosféricos através das equações dinâmicas primitivas (momento, continuidade e termodinâmica), dadas em coordenadas esféricas e sem simplificações por análise de escala. As equações de momento nada mais são do que uma contabilização de todas as forças reais e aparentes que atuam sobre uma parcela de ar na atmosfera em rotação da Terra, produzindo aceleração. Isso significa que elas são as equações básicas na “geração” do vento na atmosfera (HOLTON, 2004). As demais equações (continuidade e termodinâmica) também influem nos movimentos atmosféricos e completam o sistema de equações necessário para “resolver” o vento em 3D.

Ainda, os modelos utilizam outras parametrizações para descrever processos que ocorrem em escalas menores que a representada na sua grade, ou mesmo para descrever trocas de energia e momento entre a superfície e a atmosfera.

4.3 Avaliação do Modelo

A avaliação do Modelo Eta será feita de duas formas, porém sempre considerando o vento a 10 m de altura e a média dos 24 meses. Primeiro, graficamente, correlacionando o ciclo diário previsto pelo modelo e o ciclo observado a partir das mensagens METAR das estações dos aeroportos citados no item 4.1. Segundo, usando três testes estatísticos para quantificar o grau de incerteza do modelo: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) ou erro médio quadrático (expressão 4.2), o Erro Sistemático Médio (BIAS) ou erro médio ou viés (expressão 4.3) e o coeficiente de determinação ou R^2 (expressão 4.4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4.2)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (4.3)$$

$$R^2 = \frac{a \sum P_i + b \sum O_i P_i - n(\bar{P})^2}{\sum P_i^2 - n(\bar{P})^2} \quad (4.4)$$

Onde, P_i e O_i são respectivamente as previsões e as observações no tempo i , n é o número de dados, a coeficiente angular e b coeficiente linear da reta para a correlação de P_i e O_i .

O RMSE enfatiza a amplitude dos erros da previsão do modelo. Ele varia de 0 a infinito e seu valor para previsão perfeita é 0. Como é uma média quadrática, erros maiores possuem maior influência sobre o valor final do que os erros menores.

Já o BIAS mede o erro sistemático do modelo de subestimar ou superestimar uma variável. Ele varia de infinito negativo a infinito positivo e seu valor para previsão perfeita é 0, mas pode atingir esse valor mesmo para uma previsão ruim, caso hajam erros compensatórios.

O R^2 mede a fração da variância das observações explicada pelas predições, ou seja, mostra o quanto duas variáveis estão representando um mesmo elemento, no caso a velocidade do vento. Ele pode ser calculado elevando-se o coeficiente de correlação ao quadrado. Varia de 0 a 1, indicando que as previsões explicam, respectivamente, de 0 a 100% da variância total das observações.

4.4 Estimativa do Potencial de Energia Produzida

Esse trabalho trata-se de uma aplicação da meteorologia ao setor de energia. Assim sendo, a energia e a potência que podem ser extraídas do vento dependem basicamente da energia cinética do ar em movimento, dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [J]} \quad (4.5)$$

Onde: m é a massa em kg
 v é a velocidade do vento em m/s

A partir de (4.5) chega-se à potência disponível contida no vento, dada pela relação:

$$P_{\text{dis}} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \text{ [W]} \quad (4.6)$$

Onde: ρ é a densidade do ar em kg/m³.
 A é a área (em m²) da seção transversal de um tubo de corrente pelo qual o vento escoia a velocidade v .
 v é a velocidade do vento em m/s.

Neste caso, despreza-se a variação da velocidade do vento ao longo da área A por motivo de simplificação da análise.

Entretanto, apenas uma parte desta potência disponível pode ser utilizada por uma turbina eólica. Além disso, ao produzir um estudo para estabelecer um centro de geração eólica, é importante medir com precisão o vento pois, de acordo com (4.6), a energia disponível varia com o cubo da velocidade do vento, ou seja, dobrando-se a velocidade ocorre um aumento de oito vezes na energia. Da mesma forma, uma medição errada pode mascarar o estudo, ou seja, subestimando ou superestimando cubicamente os valores da velocidade

do vento. Assim, um pequeno erro nos valores de vento, pode-se obter valores de potência disponível e densidade de potência com erros maiores.

A densidade de potência representa a relação entre a potência eólica disponível e a área da seção transversal, dada por:

$$D_p = \frac{P_{dis}}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.7)$$

Contudo, outro aspecto importante em um projeto de potencial eólico é uma avaliação preliminar da quantidade de energia elétrica que será gerada por uma determinada instalação eólica no local escolhido, determinando-se então a viabilidade econômica do projeto.

Para isso, um dos requisitos é obter a curva que relaciona a potência gerada pela turbina eólica em função da velocidade do vento e calcular a distribuição estatística da velocidade do vento no local da instalação, como se pode verificar na Figura 4.6.

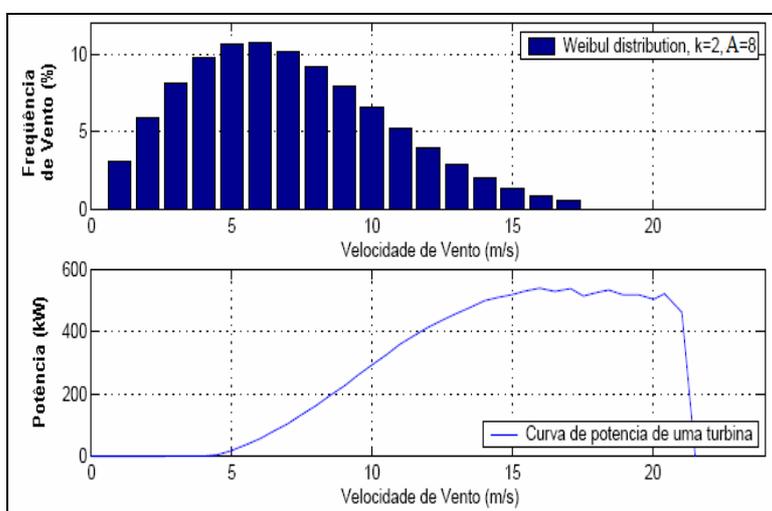


Figura 4.6 - Curva de potência e Distribuição estatística do vento em uma central eólica com potência nominal de 5 MW (10 x 500 kW).

Fonte: CBEE (2003).

A distribuição estatística da velocidade do vento mais utilizada nos estudos eólicos é a Distribuição de Weibull, dada por:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A} \right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{u}{A} \right)^k} \quad (4.8)$$

Onde A e k são os parâmetros de escala e de forma, respectivamente, e u é a velocidade do vento.

Assim, de posse da curva de potência do gerador eólico a ser utilizado e da distribuição estatística do vento, pode-se então estimar a produção total de energia elétrica, dada por:

$$E_{\text{total}} = \sum f_i P_i T \quad [\text{kWh/ano}] \quad (4.9)$$

Onde: T é o período total de tempo considerado.

P_i é a potência fornecida pela curva de potência da instalação para a classe de velocidade v_i do vento.

f_i é a frequência relativa de cada classe de v_i .

A frequência relativa é dada por:

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (4.10)$$

Onde: t_i é o período de tempo no qual foi registrada a classe de v_i .

Por último, temos como calcular o quanto está sendo aproveitado o potencial instalado de um determinado gerador. Isso é feito através do Fator de Capacidade (FC), dado por:

$$FC = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{nominal}}} = \frac{E_{\text{total}}}{P_{\text{nominal}} \times T} \quad (4.11)$$

Onde: P_{total} é a potência produzida pelo aerogerador dada por $\sum f_i P_i$.

P_{nominal} é a potência nominal do aerogerador.

4.5 Emissão de Gases

A emissão de CO₂, SO₂ e NO_x produzida pela geração de energia elétrica a partir de óleo Diesel depende de três fatores principais: o tipo/tamanho do motor, a eficiência desse motor e a mistura de combustível usada.

Para estimar a emissão desses gases na Ilha de Marajó durante o período de dezembro de 2004 a novembro de 2006, foram relacionados à quantidade de energia elétrica gerada em kWh e as informações estatísticas de emissões em g/kWh para os países da Europa, apresentadas em “Wind Energy The Facts - Environment”, Vol.4, 2004, da European Wind Energy Association (EWEA) / European Commission, baseadas em Eurelectric (2002).

De acordo com a EWEA (2004), a emissão de CO₂ em g/kWh é de aproximadamente 693 g/kWh para o grupo EU-15⁷, 724 g/kWh para EU-25⁸ e 747 g/kWh para o EU-28⁹, conforme mostrado na Figura 4.7. A média dos três grupos é de aproximadamente 721 g/kWh.

⁷ EU-15 é representado na região Norte por Dinamarca, Finlândia e Suécia; na região Central por Áustria, Bélgica, França, Alemanha, Irlanda, Luxemburgo, Países Baixos e Reino Unido; no Sul por Grécia, Itália, Portugal e Espanha.

⁸ EU-25 é representado por todos do EU-15 mais República Checa, Chipre, Estônia, Hungria, Letônia, Lituânia, Malta, Polônia, Eslováquia, Eslovênia.

⁹ EU-28 é representado por todos do EU-25 mais Bulgária, Romênia e Turquia.

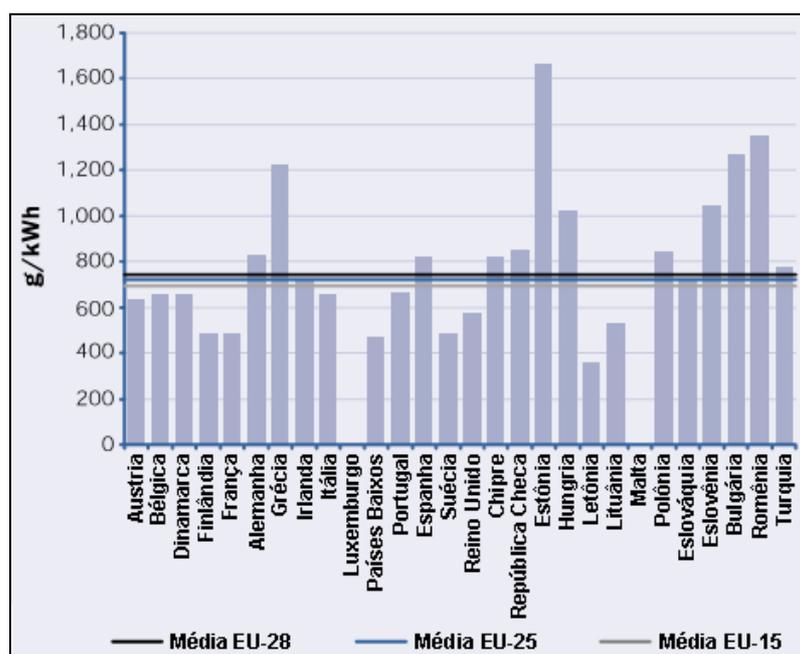


Figura 4.7 - Média das emissões específicas de CO₂ em g/kWh a partir da Geração de eletricidade de combustíveis fósseis em 2000.

Fonte: EWEA (2004), baseado em Eurelectric (2002).

A emissão de SO₂ por kWh é muito diferente entre os países europeus pelo fato do teor de enxofre ser muito heterogêneo nos combustíveis e pela dessulfuração ser usada apenas em países mais avançados. De acordo com EWEA (2004), a emissão de SO₂ em g/kWh é de aproximadamente 2,47 g/kWh para o grupo EU-15, 3,01 g/kWh para EU-25 e 4,65 g/kWh para EU-28, como mostrado na Figura 4.8. A média dos três grupos é de aproximadamente 3,37 g/kWh.

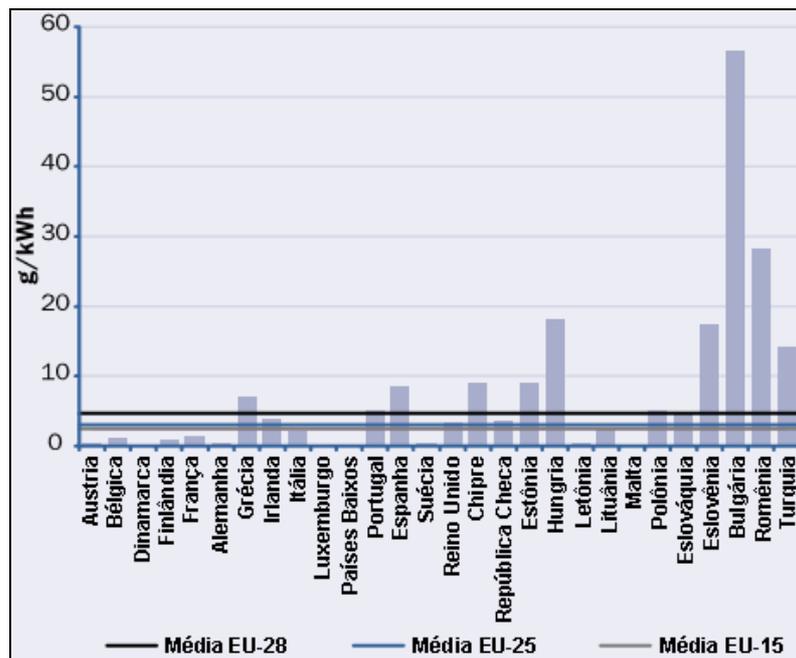


Figura 4.8 - Média das emissões específicas de SO₂ em g/kWh a partir da Geração de eletricidade de combustíveis fósseis em 2000.

Fonte: EWEA (2004), baseado em Eurelectric (2002)

A emissão de NO_x difere entre os países de acordo com o processo de combustão utilizado e com a temperatura de combustão, os quais não são homogêneos em todos os países. De acordo com EWEA (2004), a emissão de NO_x em g/kWh é de aproximadamente 1,32 g/kWh para o grupo EU-15, 1,39 g/kWh para EU-25 e 1,49 g/kWh para EU-28, como mostrado na Figura 4.9. A média dos três grupos é de aproximadamente 1,40 g/kWh.

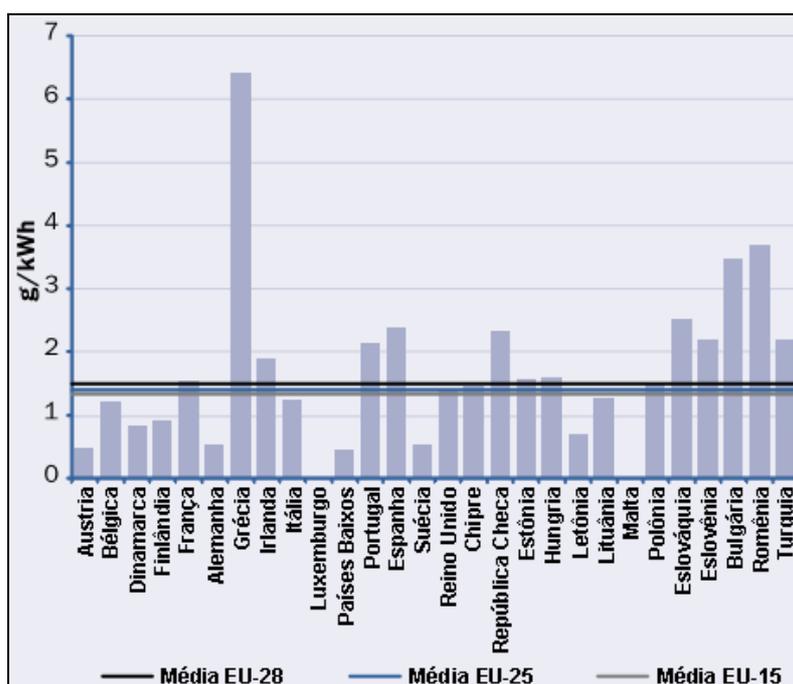


Figura 4.9 - Média das emissões específicas de NO_x em g/kWh a partir da Geração de eletricidade de combustíveis fósseis em 2000.

Fonte: EWEA (2004), baseado em Eurelectric (2002)

Neste trabalho, para estimar a emissão de CO₂ produzida pela geração de energia elétrica a partir de óleo Diesel tomaremos o valor médio de 721 g/kWh, para a emissão de SO₂ tomaremos o valor médio de 3,37 g/kWh e para a emissão de NO_x tomaremos o valor médio de 1,40 g/kWh (média para os três grupos conforme EWEA, 2004).

4.6 Procedimentos adicionais

Para fins de obter valores mais realistas do vento bem como outros dados relevantes para geração eólica, também será empregado um pacote operacional comercial conhecido como WAsP, desenvolvido e comercializado pelo Instituto de pesquisa RISO, da Dinamarca, e que tem sido padrão na área eólica. Na metodologia do WAsP, os dados de vento medidos nas estações meteorológicas ou estimados pelos modelos numéricos meteorológicos (como

por exemplo o Eta) são usados para calcular as climatologias regionais do vento. A partir disso, o pacote incorpora diversas sub-rotinas que permitem não somente conhecer o vento na altura desejada para geração eólica como também a potência gerada; a distribuição estatística de Weibull do vento e seus parâmetros de escala e de forma, a rosa dos ventos, etc. Ele permite estimar os valores de vento para uma dada região possibilitando, assim, obter o mapeamento eólico de pequenas áreas, desde que se conheça com bastante precisão a topografia, os comprimentos de rugosidade, as temperaturas e as edificações na área mapeada. Esse pacote encontra-se instalado no CPTEC e foi utilizado na execução dessa pesquisa.

Com essa metodologia, esperamos obter uma melhor aproximação para a climatologia do vento nas regiões de interesse e indicar os locais mais propícios à exploração comercial da energia eólica na região.

5 RESULTADOS

Com os resultados das simulações do Modelo Eta para a previsão de vento a 50 metros de altura, foram elaborados os mapas eólicos para a Ilha de Marajó com se segue.

5.1 Mapeamento Sazonal

Nas Figura 5.1 a Figura 5.4 são mostradas as médias sazonais da velocidade do vento em 50 m para cada estação do ano, onde DJF se refere aos meses de dezembro-janeiro-fevereiro, MAM aos meses março-abril-maio, JJA aos meses junho-julho-agosto e SON se refere aos meses setembro-outubro-novembro.

No geral, os ventos mais intensos ocorrem na parte norte/nordeste do litoral da ilha, com destaque para o trimestre SON, quando os valores médios são superiores a 6 m/s. Já o trimestre com ventos mais fracos é o MAM, com valores médios inferiores a 4 m/s.

O período DJF apresenta ventos mais fracos no interior da ilha, com média inferior a 4 m/s e ventos mais fortes na costa norte, com média de 5 m/s, podendo chegar até 7 m/s devido a influência dos alísios de nordeste e sudeste, provenientes do anticiclone do Atlântico Norte e do Atlântico Sul, respectivamente. No período MAM, há uma predominância de ventos fracos tanto no interior da ilha quanto na região costeira, quando a média não passa dos 3 m/s. Em JJA os ventos voltam a se intensificar, principalmente no interior da ilha onde se observam médias de 4 m/s e de 5 m/s na costa. Neste período, o anticiclone do Atlântico Sul está mais forte e por isso há uma maior influência dos alísios de sudeste. Em SON, os ventos continuam a se intensificar tanto no interior quanto no litoral, quando as médias superam 5,5 m/s em toda a região, com destaque para médias superiores a 7 m/s na costa. Nesse período há a maior disponibilidade eólica ao longo do ano.

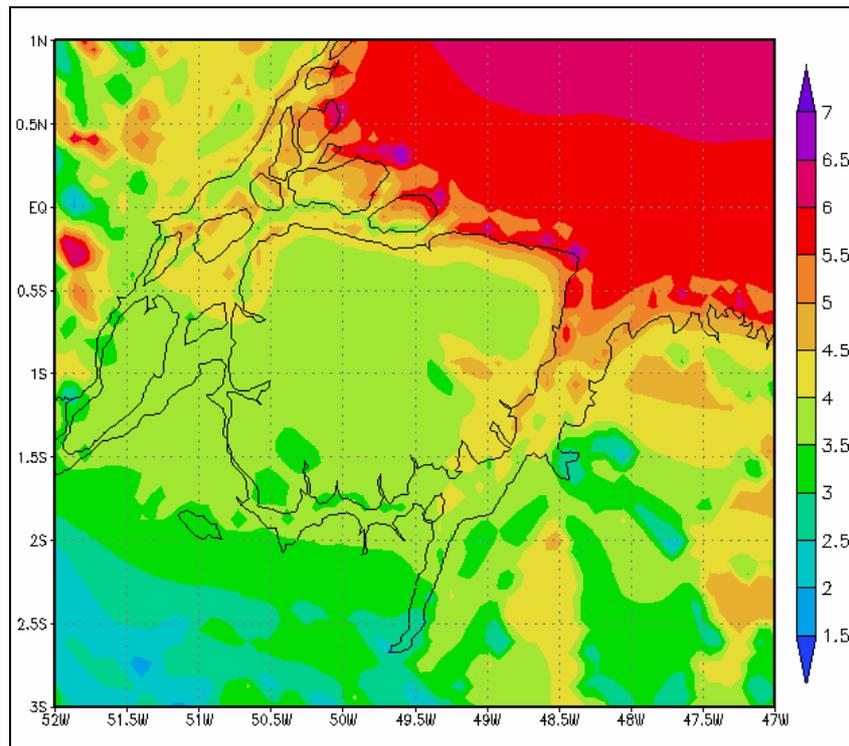


Figura 5.1 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (DJF).

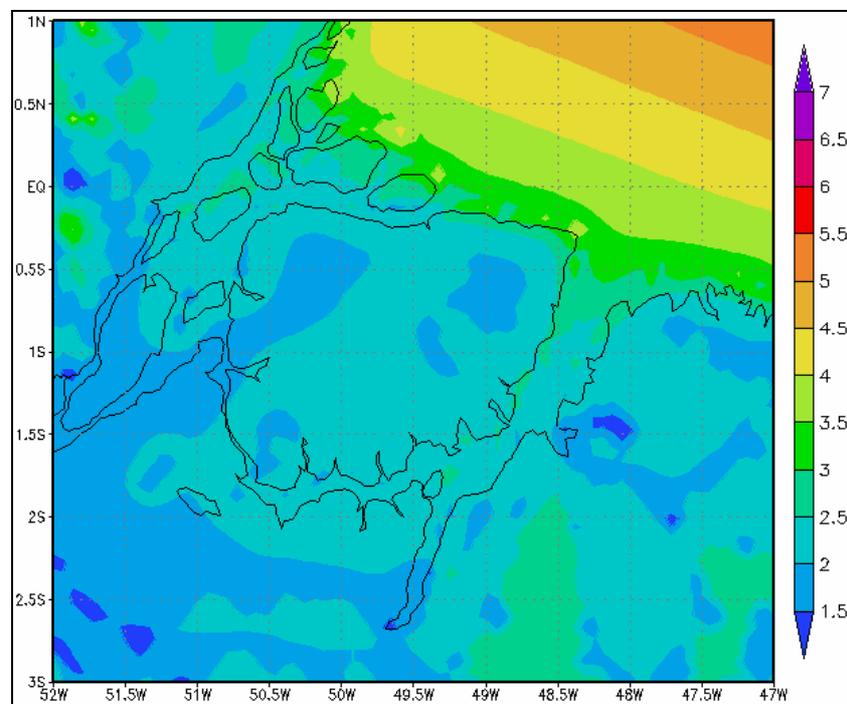


Figura 5.2 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (MAM).

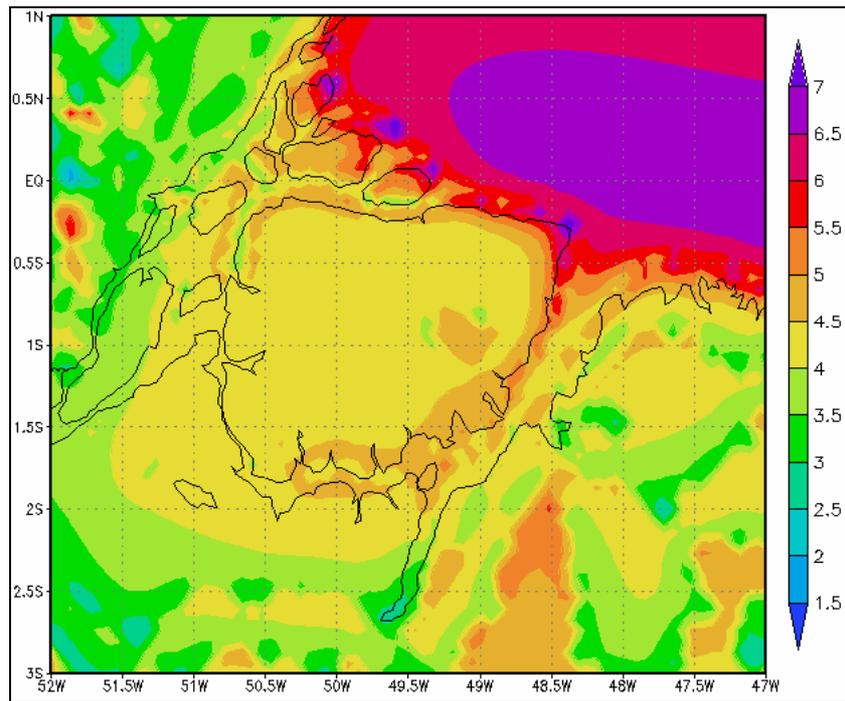


Figura 5.3 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (JJA).

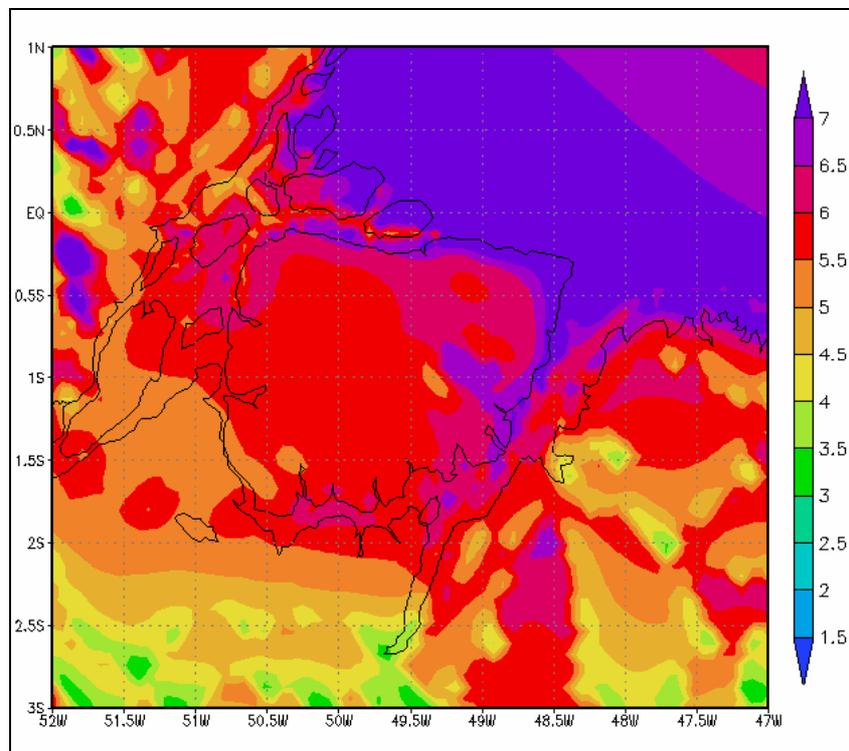


Figura 5.4 - Velocidade média sazonal do vento (m/s) a 50 m (SON).

5.2 Mapeamento Anual

Fica evidente que a região costeira apresenta maior potencial eólico em todas as épocas do ano, o que condiz com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro para a região Norte (AMARANTE et al., 2001)., conforme a Figura 2.1 (a). No geral, a média anual da velocidade é de 4 m/s no interior da ilha e de 5 a 6,5 m/s na costa, como podemos visualizar na Figura 5.5.

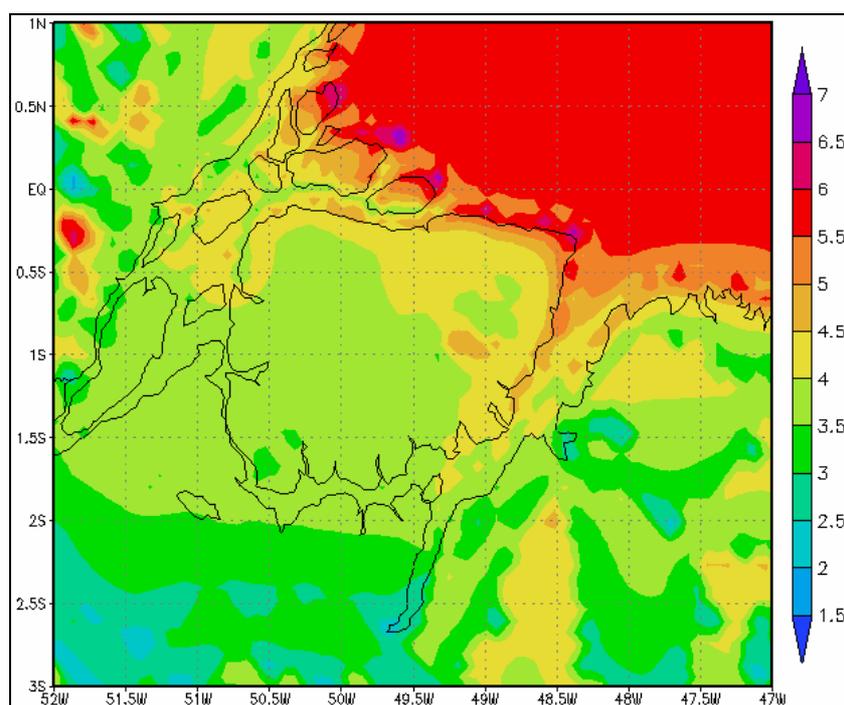


Figura 5.5 - Velocidade média anual do vento (m/s) a 50 m.

5.3 Dados observados de superfície e Avaliação do Modelo Eta

O ciclo diário médio anual da velocidade do vento a 10 m para os Aeroportos de Belém (SBBE) e Macapá (SBMQ), para os dados previstos pelo modelo e para os dados observados no período a partir das 0000 UTC de 1 de janeiro de 2005 até as 2300 UTC 31 de novembro de 2006, média de 24 meses, são mostrados nas Figura 5.6 e 5.7. Conforme descrito no item 4.5.1, também é mostrado o ciclo dos erros RMSE e BIAS.

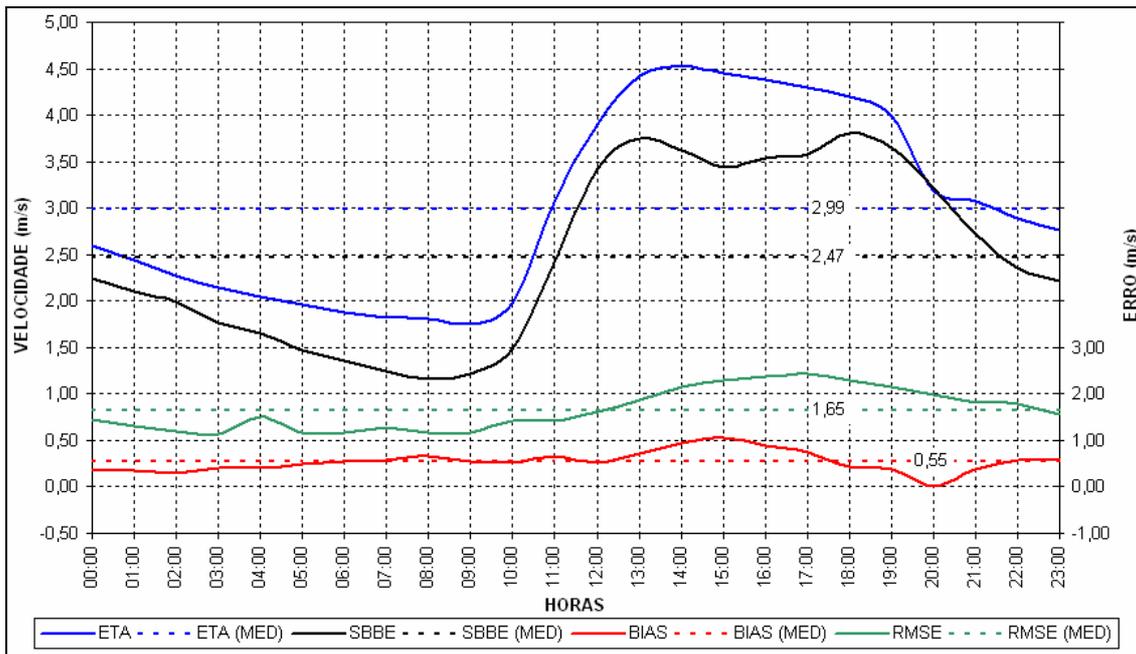


Figura 5.6 - Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) a 10 m e dos erros RMSE e BIAS para SBBE (01° 23' S / 048° 29' W / 17 m).

Na Figura 5.6, para a curva do vento observado a 10 m para o aeroporto de Belém, ocorrem dois máximos de velocidade, um às 1300 UTC e outro às 1800 UTC, os quais equivalem respectivamente a 10:00 e 15:00 horas local. Para a curva da previsão do vento, o modelo também tenta reproduzir esses dois máximos mas acaba superestimando o vento às 1300 UTC, enquanto que às 1800 UTC se aproxima muito do valor observado. No geral, o modelo representa bem o ciclo diário, com uma média diária para o observado igual a 2,47 m/s e para o previsto igual a 2,99 m/s. Outro fator que comprova o bom desempenho do modelo foram os valores do RMSE igual a 1,65 m/s, do BIAS igual a 0,55 m/s, e do R^2 (coeficiente de determinação) igual a 0,955 para todo o ciclo diário.

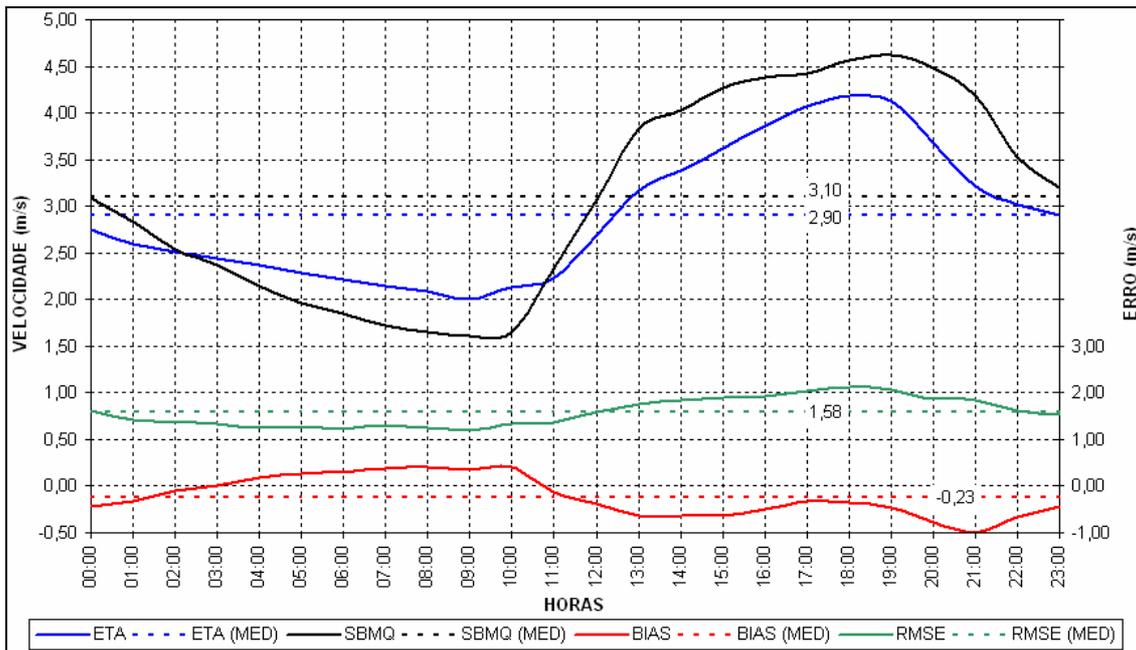


Figura 5.7 - Ciclo diário médio da velocidade do vento (m/s) a 10 m e dos erros RMSE e BIAS para SBMQ (00° 03' N / 051° 04' W / 16 m).

Na Figura 5.7, para a curva do vento observado a 10 m para o aeroporto de Macapá, ocorrem dois máximos de velocidade, um às 1300 UTC e outro às 1900 UTC, os quais equivalem respectivamente a 10:00 e 16:00 horas local. Para a curva da previsão do vento, o modelo também tenta reproduzir esses dois máximos e consegue isso com boa precisão. No geral, o modelo representa bem o ciclo diário em SBMQ. A média diária para o observado foi igual a 3,10 m/s e para o previsto igual a 2,90 m/s. Outro fator que comprova o bom desempenho do modelo foram os valores do RMSE igual a 1,58 m/s, do BIAS igual a -0,23 m/s e do R^2 (coeficiente de determinação) igual a 0,938 para todo o ciclo diário.

Com relação a direção do vento, houveram mais diferenças entre dados observados e do modelo. A frequência da direção do vento a 10 m para os Aeroportos de Belém (SBBE) e Macapá (SBMQ), para os dados previstos pelo modelo e para os dados observados no período a partir das 0000 UTC de 1 de janeiro de 2005 até as 2300 UTC 31 de novembro de 2006, média de 24 meses, são mostrados nas Figura 5.8 (a) e (b) e 5.9 (a) e (b).

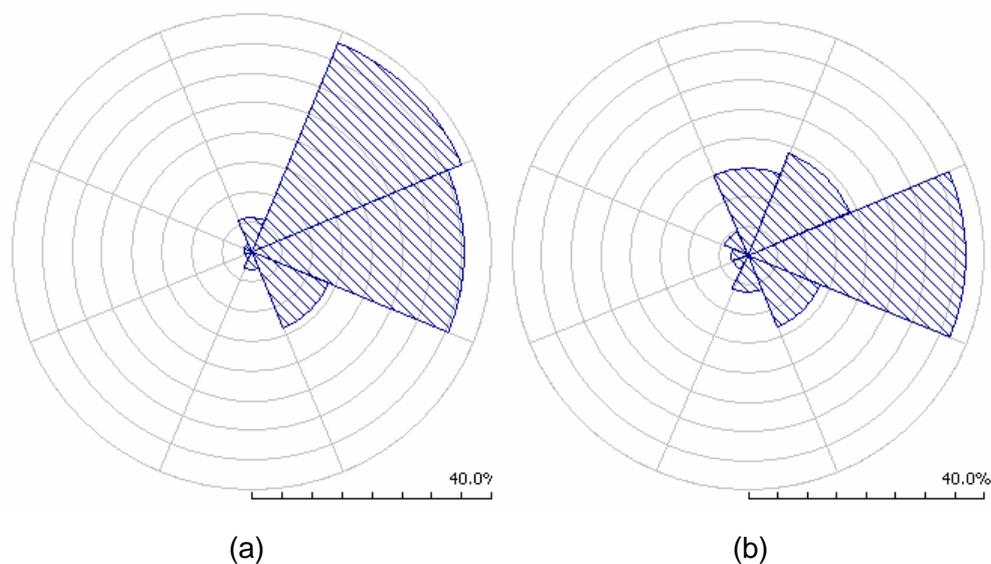


Figura 5.8 - Frequência da direção do vento para SBBE segundo (a) Modelo Eta e (b) Observado.

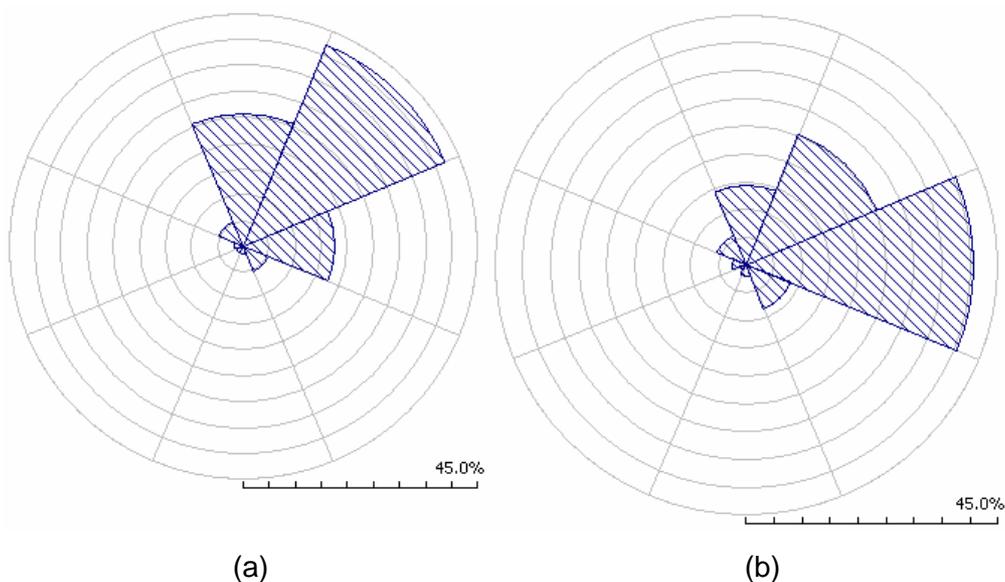


Figura 5.9 - Frequência da direção do vento para SBMQ segundo (a) Modelo Eta e (b) Observado.

Não é esperado que a direção do vento prevista pelo modelo seja acurada devido a dificuldade na representação realista das características da superfície. Ainda assim, vemos que o modelo conseguiu representar razoavelmente bem a velocidade do vento nas duas estações acima, o que assegura uma boa credibilidade dos resultados do mapeamento, mostrados nos itens 5.1 e 5.2,

para os cálculos de Potencial de Energia. (recomendação consensual da banca)

5.4 Potencial de Energia Elétrica Produzida

Antes de expor os resultados, faz-se necessário relembrar que as UTE instaladas na Ilha de Marajó correspondem a uma capacidade instalada de 31,9 MW e uma demanda de aproximadamente 98 GWh/ano.

Para estimar o Potencial de Energia Elétrica necessário para suprir essa oferta de energia, foram considerados os seguintes fatores:

- Foi escolhido aleatoriamente um local no norte da ilha, mais precisamente na latitude $0^{\circ}18' S$ e longitude $48^{\circ}36' W$, onde foi constatado através da Figura 5.5 que também ocorre um maior potencial de vento durante o ano todo.
- A partir do WASP foi feita uma análise da série de dados. Os parâmetros da Distribuição de Weibull foram obtidos para a série de dados de vento em 50 m extraídos para o local citado acima, onde a média anual da velocidade do vento é igual a 5 m/s.
- Curva de Potência fornecida pelo fabricante do modelo E-48, conforme ANEXO II.
- Cálculo da Energia Elétrica feito segundo a expressão (4.9), com e sem o valor do período T.

Da análise da série de dados de vento e da distribuição de Weibull no WASP, obteve-se os seguintes resultados, conforme podemos ver na Figura 5.10.

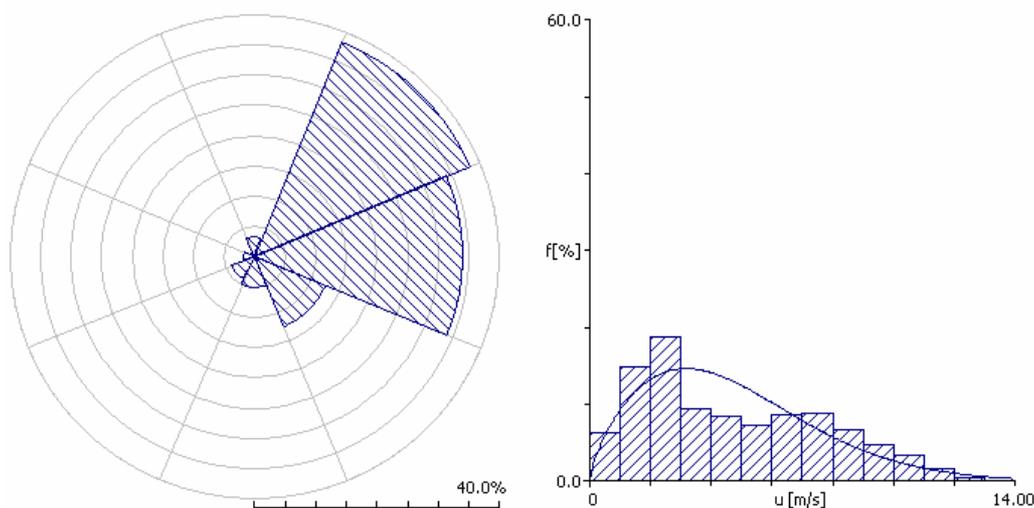


Figura 5.10 - Freqüência da direção do vento e Distribuição de Weibull para o Norte da Ilha de Marajó.

Assim sendo, o WASP indicou uma densidade de potência D_p de 151 W/m^2 , fator de escala A igual a $5,3 \text{ m/s}$ e fator de forma k igual a $1,7$ para a região Norte da Ilha de Marajó, onde a média anual da velocidade do vento é maior ou igual a 5 m/s . Esse valor, embora seja comparativamente baixo em intensidade, o fator de escala pode não ser desprezível para geração eólica para a região. Mas para isso seria necessário um estudo de viabilidade considerando, entre outras coisas, o custo comparativo da geração termoelétrica empregada no local.

A título de comparação, por exemplo, para a região de maior potencial eólico da Alemanha, amplamente explorado no litoral do país, os valores de D_p oscilam entre $144,1$ e $208,9 \text{ W/m}^2$.

De acordo com Dalmaz (2007), os valores de u , k , A , D_p e FC calculados a partir da curva de potência de um aerogerador Wobben E-40 de 600 kW , para algumas áreas no Estado de Santa Catarina onde existem alguns aerogeradores instalados, são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros e propriedades do vento para localidades em Santa Catarina.

Estação	u (m/s)	k	A (m/s)	D_p (W/m ²)	FC
Água Doce	6,24	2,44	7,04	187,30	0,23
Bom Jardim da Serra	4,96	1,66	5,54	177	0,16
Imbituba	5,05	1,74	5,67	142,2	0,16
Laguna	7,91	1,78	8,89	174,4	0,4
Campo Erê	5,4	2,34	6,09	579,8	0,16
Urubici	7,22	1,84	8,13	410,7	0,34

Fonte: Dalmaz (2007).

Os resultados do produto da freqüência da distribuição de Weibull pela Potência do Aerogerador e o período T de um ano para cada classe de velocidade são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Potencial Eólico estimado para a Ilha de Marajó.

Velocidade do vento (m/s)	Freqüência (%)	Potência (kW)	Período 1 ano = 8760 h	Energia Total (kWh)
1	6,4	0	8760	0,00
2	14,8	2	8760	2.592,96
3	18,7	12	8760	19.657,44
4	9,5	32	8760	26.630,40
5	8,5	66	8760	49.143,60
6	7,3	120	8760	76.737,60
7	8,6	191	8760	143.891,76
8	8,9	284	8760	221.417,76
9	6,8	405	8760	241.250,40
10	4,8	555	8760	233.366,40
11	3,4	671	8760	199.850,64
12	1,7	750	8760	111.690,00
13	0,4	790	8760	27.681,60
14	0,1	810	8760	7.095,60
15	0	810	8760	0,00

Logo a Potência Total Aproveitada e a Produção anual de energia elétrica de um aerogerador de 800 kW (conforme **Erro! Fonte de referência não**

encontrada.) instalado no litoral norte da Ilha de Marajó seria o equivalente a 155,36 kW e 1.361 MWh/ano (1,361 GWh/ano), respectivamente.

Assim, o FC para este caso seria de aproximadamente 0,195, o que torna o preço do MWh mais caro em relação aos grandes projetos localizados em áreas com grande potencial eólico.

Isso significa que seriam necessários 72 aerogeradores de 800 kW cada um para suprir toda a geração de energia elétrica que hoje é feita por grupo de geradores a óleo Diesel. O custo de um investimento dessa envergadura seria muito alto e, portanto, a solução seria empregar o esquema de co-geração, com apenas parte da energia sendo gerada pelos aerogeradores, com uma redução proporcional do investimento inicial. Além disso, é importante observar que o investimento inicial na implantação dos aerogeradores seria pago ao longo dos anos de operação, já que a energia eólica tem custo zero na fase de operação da planta eólica, como será visto a diante em detalhe.

5.5 Emissão de Gases

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica¹⁰ (PROINFA), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estima evitar uma emissão de 2,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano no Brasil com a implementação de mais 3.300 MW de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), produzidos por fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH), sendo 1.100 MW de cada fonte. A EWEA estima uma redução de 11 bilhões de toneladas de emissão de CO₂, com uma capacidade instalada de 1.200 GW e geração de 3.000 TWh de eletricidade, até 2020.

¹⁰ Metas e benefícios do PROINFA, http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=5

Na Ilha de Marajó, com base nos Planos de Operação do Grupo Técnico Operacional da Região Norte, da Eletrobrás, para os sistemas isolados no período de dezembro de 2004 a novembro de 2006, caso toda a produção das UTE fossem substituídas pela geração eólica (uma capacidade de 31,9 MW), seria possível evitar a emissão de 151,2 mil toneladas de CO₂ (o equivalente a 3% do que o PROINFA estima para todo o Brasil), 702 toneladas de SO₂ e 292 toneladas de NO_x para todo o período, aproximadamente 75,6 mil toneladas de CO₂/ano, 351 toneladas de SO₂/ano e 146 toneladas de NO_x/ano.

A Tabela 5.3 abaixo mostra a quantidade em toneladas de gases evitadas caso fosse instalado na região apenas um aerogerador, usando os fatores de 721 g/kWh para a emissão de CO₂, 3,37 g/kWh para a emissão de SO₂, 1,40 g/kWh para a emissão de NO_x e consumo de 0,30 m³/MWh de Diesel (limite específico de consumo dado no plano de Operação dos Sistemas Isolados; GTON /ELETROBRÁS, 2007).

Tabela 5.3 - Emissão evitada de gases para um aerogerador instalado.

Nº de Geradores	Potência Nominal (kW)	Energia Anual (MWh)	CO ₂ (t/ano)	SO ₂ (t/ano)	NO _x (t/ano)	Diesel (m ³ /ano)
1	800	1.361,01	981,285	4,587	1,905	408,3

Fonte: Elaboração própria com base em GTON /ELETROBRÁS (2006)

Dados: Plano de Operação para 2004, 2005 e 2006.

Logo, com a instalação de um aerogerador de 800 kW seria possível evitar uma emissão de 981,285 t/ano de CO₂, 4,587 t/ano de SO₂, 1,905 t/ano de NO_x e economizar aproximadamente 4.083 m³ de óleo Diesel.

5.6 Cenário de geração estimado

A proposta de implantação de uma Usina Eólica na região da Ilha de Marajó é completamente diferente dos projetos os quais já foram implementados, conforme citados no item 2.

Como vimos anteriormente, a energia produzida pelos aerogeradores é função não só do vento, mas também da curva de geração da turbina. Assim, um bom projeto eólico é aquele que apresenta um casamento adequado entre a máquina e o regime de vento.

Existe no Brasil a única fabricante de aerogeradores de médio e grande porte da América do Sul que se chama Wobben Windpower. A empresa possui a mais alta tecnologia disponível no mundo, a qual foi desenvolvida pela alemã ENERCON GmbH, que também é uma associada da Wobben Windpower. A brasileira existe há 11 anos, cuja fábrica matriz localiza-se em Sorocaba, no estado de São Paulo, além de uma filial em Pecém, Ceará.

As principais vantagens da disposição de uma fabricante nacional são:

- Contratos celebrados em moeda brasileira (Reais), para fornecimento dos aerogeradores, dos projetos "turn-key", da assistência técnica e outros serviços, evitando os riscos de variações cambiais;
- Possibilidades de linhas de financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (Finame/Finem), disponíveis em Reais, por tratar-se de produto brasileiro, que supera os índices de nacionalização exigidos no PROINFA (índice mínimo de nacionalização de 60%);
- Equipes brasileiras de técnicos para prover operação, manutenção e assistência técnica permanente, o que permite manter um alto grau de disponibilidade dos aerogeradores e elevada produção.
- Certificação não só para fabricação completa de aerogeradores, como também para realização de projetos, instalação, operação e manutenção de Usinas.
- Alta capacidade de produção no Brasil, para atender em prazo compatível, as necessidades do mercado interno.

Os aerogeradores de médio e grande porte disponíveis no mercado brasileiro são dois modelos fabricados pela Wobben Windpower: o E-48 e o E-70. O primeiro possui potência nominal de 800 kW, diâmetro do Rotor de 48 m e altura do eixo do Rotor entre 50 e 76 m, sendo o gerador de médio porte de maior sucesso em toda a história da energia eólica, com cerca de 5900 unidades instaladas em 33 países. O segundo modelo possui potência nominal de 2000 kW, diâmetro do Rotor de 71 m e altura do eixo do Rotor entre 64 e 113 m.

Todos os dois modelos têm compatibilidade total comprovada no Brasil como por exemplo com as redes das concessionárias no Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, onde inclusive encontram-se conectados ao SIN, sem introduzir perturbações na rede. Outra grande vantagem desses modelos é o fato de possuírem acoplamento direto rotor/gerador, dispensando caixa de transmissão. Além disso, atendem aos índices de nacionalização exigidos pelo PROINFA.

No caso da Ilha de Marajó, o mais indicado seria o da família E-48, principalmente devido à baixa velocidade de início de geração que é compatível com o regime de vento da região. Como exemplo, temos a Central Geradora Eólica Millennium, em Mataracá na Paraíba, composta por 13 unidades E-48 de 800 kW, com capacidade total de 10,4 MW, conforme Figura 5.11.



Figura 5.11 - Central Geradora Eólica Millennium, Mataracá, PB.

Fonte: Wobben Windpower, disponível em
<<http://www.wobben.com.br/usinas.htm>>

Relatórios da Eletrobrás, apontam que os Valores Econômicos da geração eólica variam de R\$ 203,00 a R\$ 231,00 por MWh, para FC entre 0,42 e 0,32, respectivamente, ou seja, quanto maior o FC, menor o preço. Esses valores são superiores à média de preços dos leilões de energia nova, de aproximadamente R\$ 139,00 por MWh.

Entretanto, com o desenvolvimento da indústria nacional de fabricação de aerogeradores e partes integrantes, os custos de implantação tenderão a se reduzir, na medida em que houver concorrência entre as empresas, conseqüentemente tornando o valor desta energia mais competitivo.

A partir dessas informações, pode-se estimar o retorno do investimento na energia eólica com base no custo evitado na compra de Diesel e no custo do

kW instalado para um aerogerador instalado na região. Para esse cálculo empregou-se o valor de R\$ 2,10/L para o custo médio do Diesel e de R\$ 3.100,00/kW¹¹ no custo total de instalação para um aerogerador como mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Potência Nominal, Energia Anual e Custo pelo número de aerogeradores.

Nº de Geradores	Potência Nominal (kW)	Energia Anual (MWh)	Custo da Potência Instalada (R\$/kW)	Custo evitado com Diesel (R\$/ano)
1	800	1.361,01	R\$ 2.480.000,00	R\$ 857.436,30

Fonte: Elaboração própria com base em GTON /ELETROBRÁS (2006).

Logo, com a instalação de um aerogerador de 800 kW seria possível evitar um custo anual de R\$ 857.436,30 na compra de óleo Diesel, o que resultaria num retorno de investimento, com base nas hipóteses acima, da ordem de 3 anos.

Importante notar que, no caso do óleo Diesel foi considerado apenas o custo do combustível, excluindo-se o custo do transporte e armazenagem do mesmo. No caso do custo do kW instalado, não foi considerado o valor praticado para o modelo E-48 e sim para o E-70, modelo maior e mais caro.

Assim, levando-se em conta esse custo adicional do combustível e um custo menor do kW instalado para o modelo E-48, o retorno do investimento seria ainda mais favorável ao aproveitamento do recurso eólica na Ilha de Marajó. (recomendação consensual da banca)

¹¹ Valor estimado com base no custo de 465 milhões para uma potência instalada de 150 MW nos três parques eólicos de Osório, compostos por 75 unidades geradoras do modelo E-70 de 2.000 kW. Informações contidas no site Ventos do Sul Energia, empresa responsável pela implantação do empreendimento. Endereço <http://www.ventosdosulenergia.com.br/>

5.7 Custo da Geração de Energia no Brasil no Futuro

Projeções do Ministério de Minas e Energia (MME) e um levantamento feito pelo Projeto Brasil para os próximos dez anos mostraram como será os custos das fontes que comporão a matriz elétrica brasileira no futuro.

Atualmente, o custo médio das hidrelétricas é de 90 R\$/MWh. O custo da eletricidade de novas unidades chega a 112 R\$/MWh, de acordo com o último leilão de energia nova promovido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As expectativas são de expansão, mas com preço estável até 2015.

A energia das termoeletricas custa em média 98 R\$/MWh. A projeção é de que esse valor encareça a eletricidade pela maior preocupação com o meio ambiente, pois existe o constante risco de acidentes e o problema de descartar o lixo nuclear.

Na geração eólica, os custos da energia são proporcionais ao rendimento de cada unidade, isso é medido pelo Fator de Capacidade e quanto maior ele for, menor será o preço. Atualmente o preço oscila entre R\$ 207,32 R\$/MWh e 235,13 R\$/MWh. Espera-se que esse valor fique menor na medida em que ocorra um maior desenvolvimento tecnológico e industrial, fato que já vem sendo observado.

O custo do investimento em biomassa de bagaço de cana é de aproximadamente 107,90 R\$/MWh, valor competitivo em relação à geração hidrelétrica, por exemplo. Essa fonte está sendo considerada como uma das mais promissoras para os próximos anos.

Já a geração solar chega a custar até duas vezes o valor de outras fontes. Em contrapartida, os coletores termo-solares no uso para aquecimento de água tem hoje preços competitivos e um mercado em expansão. Embora não produzam eletricidade, atuam através do aumento da eficiência energética.

O importante nisso tudo é que o Brasil continuará tendo uma matriz de geração de energia elétrica cada vez mais oriunda de fontes renováveis, numa porcentagem muito superior em relação a qualquer outro país do mundo, principalmente em relação aos mais desenvolvidos, como tem sido visto a cada novo Balanço Energético Nacional feito pelo MME,

6 CONCLUSÕES

Nesse estudo, utilizou-se dados de vento obtidos pelo modelo Eta para se chegar a uma primeira aproximação sobre a viabilidade de se empregar aerogeradores na Ilha de Marajó, em esquema de co-geração com as usinas termelétricas hoje empregadas no suprimento da energia local.

O uso de dados de modelo para esse estudo de viabilidade não chegou à etapa de detalhamento, ou “micrositting”, do Inglês, já que o custo da instalação de torres anemométricas e o longo tempo necessário para a coleta dos dados seriam incompatíveis com o objetivo de um trabalho de Mestrado. No entanto, o emprego de dados de modelo mostrou ser suficientes para um primeiro nível de estudos pois tem fornecido resultados bastante satisfatórios Chou et al. (2006) e Lyra et al. (2006).

Numa etapa mais avançada para a correta avaliação do potencial eólico da região e um estudo conclusivo de viabilidade econômica de tal empreendimento, seria necessário instalar torres anemométricas com, pelo menos 50 metros de altura, nas regiões mais favoráveis indicadas pelo modelo, com anemômetros e termômetros em dois ou mais níveis.

No geral, o modelo Eta indicou que os ventos mais intensos ocorrem na parte norte/nordeste do litoral da ilha, com destaque para o período SON, quando os valores médios são superiores a 6 m/s e quando há a maior disponibilidade eólica ao longo ano.

O período DJF apresentou ventos mais fracos no interior da ilha, com média inferior a 4 m/s e ventos mais fortes na costa norte, com média de 5 m/s, podendo chegar até 7 m/s. No período MAM, houve uma predominância de ventos fracos tanto no interior da ilha quanto na região costeira, quando a média não passa dos 3 m/s. Em JJA os ventos voltam a se intensificar, principalmente no interior da ilha onde se observam médias de 4 m/s e de 5 m/s na costa. Em SON, os ventos continuam a se intensificar tanto no interior

quanto no litoral, quando as médias superam 5,5 m/s em toda a região, com destaque para médias superiores a 7 m/s na costa. É nesse período quando há maior disponibilidade eólica ao longo do ano.

Os resultados do modelo foram validados a partir de dados observados das estações meteorológicas de superfície dos aeroportos de Belém, Pará (SBBE) e Macapá, Amapá (SBMQ), que foram as estações disponíveis mais próximas do local de estudo. No caso de SBBE, o ciclo diário da velocidade do vento em 10 metros teve uma média diária igual a 2,47 m/s para o observado contra 2,99 m/s para o modelo. Na avaliação dos erros, o RMSE foi igual a 1,65 m/s, o BIAS igual a 0,55 m/s e o R^2 igual a 0,955 para todo o ciclo. Em SBMQ, a média diária para o observado foi igual a 3,10 m/s e para o previsto igual a 2,90 m/s. Na avaliação dos erros, o RMSE foi igual a 1,58 m/s, o BIAS igual a -0,23 m/s e do R^2 (coeficiente de determinação) igual a 0,938 para todo o ciclo. Mas na avaliação da previsão da direção do vento, os resultados do desempenho do modelo não foram tão bons quanto na previsão da velocidade.

Entretanto, mesmo não tendo tanto sucesso nas estimativas da direção do vento, vemos que o modelo conseguiu representar bem a sua velocidade, o que assegura uma boa credibilidade dos resultados do mapeamento eólico e dos cálculos de Potencial de Energia.

O emprego do modelo WASP indicou uma densidade de potência de 151 W/m² com um fator de forma de 1,7 e de escala de 5,3 m/s, os quais não são, a primeira vista, muito promissores para investimentos em energia eólica nessa região. Contudo levando-se em conta a variabilidade e dependência do custo do combustível diesel empregado nas usinas termoelétricas da região, e o custo ambiental desses geradores pela emissão de gases do efeito-estufa, tais ventos indicam a possibilidade de exploração da energia eólica em esquema de co-geração. Ainda, levando-se em conta o baixo custo de operação da usina eólica, essa possibilidade se torna ainda mais atraente considerando o retorno do investimento inferior a 3 anos, na forma de economia de óleo diesel.

Considerando os aerogeradores de médio porte fabricados no Brasil, já testados e aprovados em empreendimentos nacionais com bom índice de satisfação e compatibilidade, escolhemos um modelo que julgamos mais apropriado para a região de estudo, a fim de realizar cenários de geração de energia para a mesma.

Como resultados para um aerogerador de 800 kW (conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) instalado no litoral norte da Ilha de Marajó, obtivemos uma potência total de geração igual a 155,36 kW e uma produção anual de energia elétrica igual a 1.361 MWh/ano. O FC para este caso foi igual a aproximadamente 0,195, o que torna o preço do MWh mais caro em relação ao produzido em sítios mais favoráveis, como o de Osório, no Estado do Rio Grande do Sul.

Assim, de acordo com a demanda anual de 98.012.107 kWh na Ilha de Marajó em 2004, seriam necessários 72 aerogeradores instalados para suprir toda a geração de energia elétrica que hoje é feita por grupo de geradores a óleo Diesel.

Esse número de aerogeradores tornaria o projeto financeiramente inviável. Mas um investimento focando a produção de energia elétrica em esquema de co-geração, poderia reduzir substancialmente esse custo.

Como foi visto, se toda a produção de energia das UTE (durante dezembro de 2004 a novembro de 2006) fosse substituída pela geração eólica, seriam evitadas emissões de aproximadamente 151,2 mil toneladas de CO₂ (o equivalente a 3% do que o PROINFA estima para todo o Brasil), 702 toneladas de SO₂ e 292 toneladas de NO_x para todo o período, aproximadamente 75,6 mil toneladas de CO₂/ano, 351 toneladas de SO₂/ano e 146 toneladas de NO_x/ano. Lembrando que esse cenário é feito com base no uso de aerogeradores de médio porte já disponíveis no mercado brasileiro e com compatibilidade total já comprovada no Brasil, atendendo as exigências do PROINFA.

No esquema de co-geração, a cada aerogerador de 800 kW instalado seria possível evitar uma emissão de 981,285 t/ano de CO₂, 4,587 t/ano de SO₂, 1,905 t/ano de NO_x e economizar aproximadamente 4.083 m³ de óleo Diesel, evitando um custo anual de R\$ 857.436,30.

O mais interessante é que, com a instalação de um aerogerador de 800 kW, com um custo total de R\$ 2.480,000,00, seria possível ter o investimento pago em 2,89 anos, ou seja, menos de três anos.

Por fim, a Ilha de Marajó possui um potencial eólico moderado o qual pode ser aproveitado não no sentido de substituir a geração termelétrica, já que a 50 metros de altura o vento possui uma média anual inferior a 10 m/s, mas sim para uma redução no uso das mesmas, com evidente economia de combustível e, ao mesmo tempo, diminuição da emissão de gases do efeito estufa e de particulados na atmosfera.

Nesse contexto e como sugestões para trabalhos futuros, espera-se que, a partir desse estudo preliminar, pesquisadores e investidores possam partir para estudos mais detalhados, empregando torres anemométricas nos locais indicados, para que se possa ter um correto dimensionamento do potencial eólico da região.

O uso da geração eólica, não só na Ilha de Marajó, poderá baratear o custo do kWh produzido e promover um maior desenvolvimento econômico e social da região, dada a maior disponibilidade de energia elétrica e os benefícios que ela pode trazer.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; de SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia / Eletrobrás / CEPEL / Cresesb, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p. Disponível em: <<http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao/download.htm>. Acesso em: 01 abr. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração - BIG**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/15.htm>>. Acesso em: 6 out. 2008.

ARAKAWA, A.; LAMB, V.R. Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model. **Methods in Computational Physics**. v. 17, p. 173-265, 1977.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2. Ed. North Carolina, USA: Academic Press, 2001.

ASSIS, F. N. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Ed. Universitária, 1996.

BARBOSA, C. F. O.; J. T. PINHO; E. J. S. PEREIRA; M. A. B. GALHARDO; S. B. VALE; W. M. A. MARANHÃO, 2004. Situação da Geração Elétrica Através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas Frente à Universalização da Energia Elétrica. In: Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída (AGRENER GD 2004), 5., 2004, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2004.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**. v. 9, n. 2, p. 265-284, 1994.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco energético nacional 2008: ano base 2007 resultados preliminares**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2008. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 17 mar. 2007.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (ELETROBRÁS). **Mapas eletrogeográficos - 2008**. Disponível em: <<http://www.eletrabras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMIS79364694PTBRNN.htm>>. Acesso em: 14 out. 2008.

CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA (CBEE). **Guia de projeto elétrico de centrais eólicas**, v. 1. Recife: 2003. Disponível em: <<http://www.eolica.com.br/guia1.html>>. Acesso em: 29 jan. 2007.

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I. Model implementation and sensitivity. **Monthly Weather Review**. v. 129, p. 569-585, 2001.

CHOU, S. C.; PAIVA NETO, A. C.; CHAGAS, D. J.; LYRA, A.; PEREIRA, E. B. Mapeamento eólico para o nordeste. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET 2006), 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.

COHEN, J. C. P.; SÁ, L. D. A.; NOGUEIRA, D. S.; GANDU, A. W. Jatos de baixos níveis acima da floresta amazônica em Caxiuanã (PA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n. 3b, p. 271-282, 2006.

DALMAZ, A., **Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION (DWIA). **WINDPOWER.ORG**.

Version 4.1, 2003. Disponível em: <<http://www.windpower.org/en/core.htm>>.

Acesso em: 27 mar. 2007.

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA). **Wind energy the fact – environment**. v. 4, 2004. Disponível em:

<<http://www.ewea.org/index.php?id=91>>. Acesso em: 30 out. 2008.

FEARNSIDE, P. M. **Why hydropower is not clean energy**. Scitizen, Paris, France, 2007.

FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Reply to Rosa et al. **Climatic Change**, v. 75, n. 1-2, p. 103-109, 2006.

FEITOSA, E. A. N.; PEREIRA, A. L.; VELEDA, D.; SILVA, G.; CAHETÉ, C.

Panorama do potencial eólico no brasil. Brasília : Dupligráfica, 2003.

FELS, S. B., and M. D. SCHWARZKOPF. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, n.7, p. 1475-1488, 1975.

FERRIER, B. A new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In Spring Colloquim on the Physics of Weather and Climate: Regional Weather Prediction Modelling and Predictability. Trieste, Italy, 2002.

GASCH, R.; TWELE, J. **Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation**. 2002, Solarpraxis AG, Berlin, ISBN: 3-934595-23-5.

Global Wind Energy Council (GWEC). **Global wind report, 2005**. 2005.
Disponível em: <<http://www.gwec.net/index.php?id=49>>. Acesso em: 11 mar. 2007.

GRUPO TÉCNICO OPERACIONAL DA REGIÃO NORTE (GTON). **Plano de operação para 2004 dos sistemas isolados**. GTON / CTP – 002 / 2004.
(Eletrobrás). Disponível em:
<<http://www.eletrobras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMISB4C86407PTBRNN.htm>>
. Acesso em: 14 out. 2008.

GRUPO TÉCNICO OPERACIONAL DA REGIÃO NORTE (GTON). **Plano de operação para 2005 dos sistemas isolados**. GTON / CTP – 014 / 2005.
(Eletrobrás). Disponível em:
<<http://www.eletrobras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMISB4C86407PTBRNN.htm>>
. Acesso em: 14 out. 2008.

GRUPO TÉCNICO OPERACIONAL DA REGIÃO NORTE (GTON). **Plano de operação 2006 dos sistemas isolados**. GTON / CTP – 001 / 2006.
(Eletrobrás). Disponível em:
<<http://www.eletrobras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMISB4C86407PTBRNN.htm>>
. Acesso em: 14 out. 2008.

HOLTON, J. R. **An introduction to dynamic meteorology**, 3. ed. San Diego: Academic Press, p. 535, 2004.

JANJIC, Z.I. Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. **Contributions to Atmospheric Physics**, v. 52, p. 69-84, 1979.

JANJIC, Z.I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 927-945, 1994.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150 cm x 200 cm, 1928.

LACIS, A. A.; J. E. HANSEN. A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; PEREIRA, E. B.; de SÁ, A. L. Avaliação da previsão de vento a 50 m de altura gerada pelo modelo Eta-5 km para região Nordeste. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET 2006), 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.

Metodologias Integradas para o Mapeamento de Energias Alternativas no Estado do Pará (MEAPA). **Relatório do Projeto MEAPA**, Janeiro, 1999.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysical Physics and Space Physics**, v. 20, p. 851-875, 1982.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, p. 195-202, 1984.

MESINGER, F.; JANJÍČ, Z. I.; NIXKOVIĆ, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1493-1518, 1988.

MITCHELL, K., 2001. **The Community NOAA Land Surface Model (LSM)**.

Disponível em:

<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/noahls/README_2.2.htm>, último acesso em 12 de maio de 2008.

MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. **Trudy Geofiz. Inst. Akad. Nauk SSSR** 24(151): 163–187.

OPERADOR NACIONAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS (Brasil) (ONS). **Mapas do SIN**: Sistema de Transmissão Horizonte - 2007 / 2009. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em: 14 out. 2008.

OPERADOR NACIONAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS (Brasil) (ONS). **Operação do SIN – dados relevantes**. Relatório anual, 2005. Disponível em: <http://www.ons.org.br/biblioteca_virtual/publicacoes_operacao_sin.aspx#>. Acesso em: 25 mar. 2007.

PARÁ (Estado). Secretaria Executiva de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças (SEPOF). **Relatório de estatística municipal, 2006**. Disponível em: <<http://www.sepof.pa.gov.br/mesorregiao.html>>. Acesso em: 21 fev. 2007.

ROBALLO, S. T.; FISCH, G. Estudo das características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET 2006), 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.

SILVA, I.M.O.; ROCHA, B.R.P. Estudo da Variabilidade do Vento na Ilha do Marajó. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET 2002), 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002.

SILVA, I.M.O.; ROCHA, B.R.P. Mapeamento Eólico para a Região da Ilha do Marajó. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET 2002), 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002.

UNION OF THE ELECTRICITY INDUSTRY (EURELECTRIC). **Statistics and prospects for the european electricity sector (1980-1990, 2000-2020), EUR-PROG 2000**. 28. ed. Belgium, 2000.

ANEXO I

Setores de Consumo de Energia Elétrica:

Residencial – É aquela em que as unidades consumidoras utilizam a energia elétrica para fins residenciais, salvo aqueles situados em propriedade rural na qual seja desenvolvida atividade agropecuária com objetivo econômico. Inclui-se nesta classe o fornecimento para uso comum de prédios ou conjuntos com predominância de unidades consumidoras residenciais.

Comercial – É aquela em que as unidades consumidoras exercem atividade comercial e de prestação de serviços (exclusive os serviços públicos). A classe comercial deve ser estratificada nas seguintes subclasses: comercial; serviços de transporte, exclusive tração elétrica; serviços de comunicação e telecomunicações; serviços de irrigação; outros serviços.

Industrial – É aquela em que as unidades consumidoras desenvolvem atividades industriais. Para que se tenha um conjunto mais homogêneo com relação à atividade industrial sugere-se estratificar os consumidores nos seguintes gêneros: extração de tratamento de minerais; produtos minerais não metálicos; metalúrgica; mecânica; material elétrico e de comunicações; madeira; mobiliária; papel e papelão; borracha; couros; peles e produtos similares; química; produtos farmacêuticos e veterinários; perfumaria, sabões e velas; produtos de materiais plásticos; têxtil; vestuário, calçados e artefatos de tecidos; produtos alimentares; bebidas; fumo; editorial e gráfica, diversos; utilidade pública; e construção.

Outros – São alocadas nesta categoria as unidades consumidoras não previstas nas demais classes, inclusive o fornecimento destinado às instalações de uso comum de prédio ou conjunto com predominâncias de unidades consumidoras não residenciais. Dentre as que se classificam como outros se destacam o setor rural (são alocados nesta categoria consumidores

que desenvolvem atividade rural com objetivos econômicos. Esta categoria é estratificada nas seguintes subclasses: agropastoril; cooperativa de eletrificação rural; indústria rural e coletividade rural); consumo próprio (fornecimento destinado ao próprio concessionário devendo ser consideradas as seguintes subclasses: consumo próprio, canteiro de obras e interno); iluminação pública (são alocados iluminação de ruas, praças, avenidas, jardins, vias, estradas e outros logradouros de domínio público de uso comum e livre acesso de responsabilidade de pessoa jurídica de direito público); serviço público (são alocados os consumidores que utilizam motores, máquinas e equipamentos para prestação de serviços públicos de água, esgoto, saneamento e tração urbana e/ou ferroviária explorados mediante concessão ou autorização); e poder público (são alocados os consumidores independentes da atividade desenvolvida, que forem de responsabilidade de pessoa jurídica de direito público, exceto a iluminação pública e os serviços públicos).

ANEXO II

Especificações Técnicas do Aerogerador E-48

Especificações Gerais

Fabricante:	WOBBEN Windpower / ENERCON GmbH
Família:	E-48
Potência nominal:	800 kW
Diâmetro do Rotor:	48 m
Altura do eixo do Rotor:	50 - 76 m (torre tubular em concreto ou aço e diferentes fundações)

Especificações da Pá

Rotor com controle ativo de ângulo de passo das pás

Tipo:	Na frente da torre
Sentido de rotação:	Horário
Número de pás:	3
Área varrida pelas pás:	1810 m ²
Material das pás:	Epóxi (reforçado com fibra de vidro), com proteção total contra descargas atmosféricas
Velocidade do rotor:	Variável, 16 - 32 RPM
Velocidade de Ponta de Pá:	Variável, 40 - 80 m/s
Controle de potência:	Três sistemas elétricos de acionamento sincronizado do ângulo de passo das pás, com suprimento reserva de energia para emergências

Especificações do Gerador

Gerador de anel ENERCON com acionamento direto rotor/gerador

Eixo:	Rígido
Mancais:	Rolamento de rolos de uma pista
Alimentação da rede elétrica:	Conversor ENERCON
Sistemas de frenagem:	Três sistemas independentes de controle do ângulo de passo das pás Freio de rotor Trava de rotor para serviço e manutenção
Controle de orientação:	Ativo por engrenagens, amortecimento dependente do esforço
Velocidade do vento:	Início de produção 3 m/s Potência nominal 13 m/s Corte de produção 28-34 m/s
Curva de potência:	Ver Figura II.1
Monitoramento remoto:	Sistema ENERCON SCADA

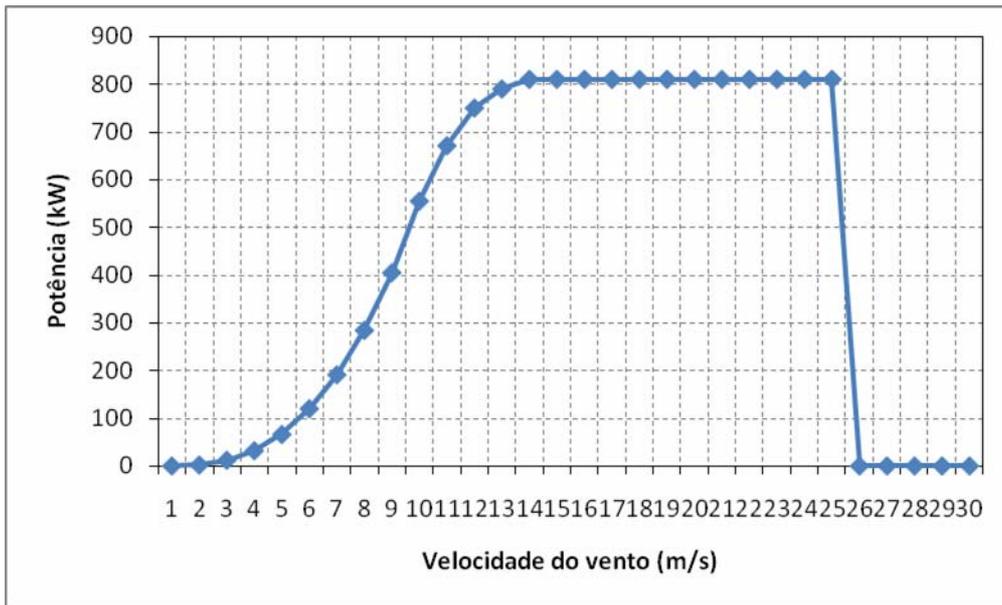


Figura II.1 – Curva de potência do aerogerador E-48.