

BRUNO LOPES DE FARIA

**MODELAGEM DO POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE DO BRASIL SOB
CONDIÇÕES ATUAIS E DE AQUECIMENTO GLOBAL: UMA INTERFACE ENTRE
MODELOS NUMÉRICOS COMPUTACIONAIS DE MICROESCALA E
MESOESCALA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

F224m
2010

Faria, Bruno Lopes de, 1982-

Modelagem do potencial eólico do Nordeste do Brasil sob condições atuais e de aquecimento global : uma interface entre modelos numéricos computacionais de microescala e mesoescala / Bruno Lopes de Faria. – Viçosa, MG, 2010.

x, 60f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 56-60.

1. Recursos naturais renováveis. 2. Energia eólica - Fatores climáticos - Brasil, Nordeste. 3. Mudanças climáticas. 4. Aquecimento global. 5. Circulação atmosférica. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

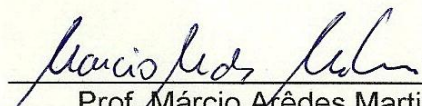

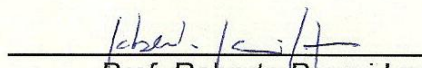
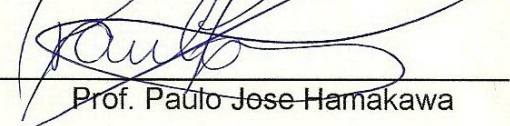
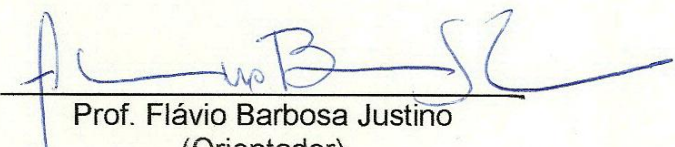
CDD 22. ed. 621.042

BRUNO LOPES DE FARIA

**MODELAGEM DO POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE DO BRASIL SOB
CONDIÇÕES ATUAIS E DE AQUECIMENTO GLOBAL: UMA INTERFACE ENTRE
MODELOS NUMÉRICOS COMPUTACIONAIS DE MICROESCALA E
MESOESCALA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de julho de 2010

 Prof. Márcio Arêdes Martins (Co-Orientador)	 Prof. José Maria Nogueira da Costa (Co-Orientador)
 Prof. Roberto Precci Lopes	 Prof. Paulo Jose Hamakawa
 Prof. Flávio Barbosa Justino (Orientador)	

*Dedico este trabalho à minha família;
em especial à minha mãe Maria das
Graças Teixeira Lopes*

BIOGRAFIA

Bruno Lopes de Faria, filho de João Lopes de Faria Filho e Maria das Graças Teixeira Lopes, natural de Viçosa/MG, nasceu no dia 19 de fevereiro de 1982.

Em 2004 iniciou o curso de Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa, vindo, em 2006, atuar no Projeto Zoneamento de Riscos Climáticos, como estudante de iniciação científica.

Em janeiro de 2008 graduou-se bacharel em Ciência da Computação. Em agosto do mesmo ano ingressou no Programa de Pós-Graduação, nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola, área de concentração em Climatologia.

Em dezembro de 2009 foi premiado no *Eco_Lógicas: Concurso Nacional de Monografias sobre Energias Renováveis e Eficiência Energética*, voltado para estudantes de pós-graduação das instituições de ensino brasileiras, promovido pelo Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. Este é um prêmio de destaque nacional dada a grande quantidade de cursos de pós-graduação de instituições públicas e privadas que abordam a temática energética do ponto de vista tecnológico, social e ambiental.

Em junho de 2010 foi aprovado em 1º lugar no concurso para professor efetivo do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Norte de Minas (IFNMG).

Em julho de 2010 submeteu-se à defesa de tese no programa de Mestrado em Meteorologia Agrícola.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. O Recurso Eólico.....	2
1.2. Energia Eólica	3
1.3. O Vento.....	3
1.4.Custos	4
1.5. Panorama da Energia eólica no Brasil e no Mundo.....	6
1.5.1 Mudanças Climáticas e seu impacto no potencial eólico	10
1.6.. Análise – Características De Vento Do Nordeste	13
1.6.1. Circulação Geral da Atmosférica.....	13
1.6.2.. Escalas De Espaço	15
1.6.3. Escala regional ou Mesoescala	16
1.6.4.. Escala local ou Microescala	16
1.7.. Rugosidade aerodinâmica da superfície e lei logarítmica do vento.....	19
1.8 - Camada Limite Superficial (CLS).....	21
1.9 Escoamento sobre Colinas e a Interferência na CLA	22
2 OBJETIVOS.....	25

2.1. Objetivo	25
2.1.1 . Objetivos Específicos.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. Descrição do Modelo Regional (MM5)	27
3.2. Área de estudo (Modelo Regional)	29
3.3. Modelo Numérico de Microescala	31
3.4 Modelo de Turbulência	34
3.5 Área de estudo (modelo microescala).....	35
3.6 Condições de Contorno Utilizadas	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 Modelo de Mesoescala.....	41
4.1.1 Análise dos períodos do Modelo MM5	41
4.2. Modelo de microescala	47
5 CONCLUSÕES.....	54
6 REFERÊNCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 PARCELA DO CUSTO DE INSTALAÇÃO -NATURAL RESOURCES (CANADA 2009).....	5
FIGURA 1.2 - CENÁRIO DE ENERGIA EÓLICA NO MUNDO ATÉ 2007. FONTE ELETROBRÁS 2008	7
FIGURA 1.3 DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO BRASIL.....	8
FIGURA 1.4 OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL POR FONTE ENERGÉTICA. FONTE: ADAPTADO DE BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2008.	9
FIGURA 1.5 - <i>COMPARAÇÃO ENTRE O VAZÃO DO RIO SÃO FRANCISCO E O REGIME DE VENTO NO NORDESTE DO BRASIL. FONTE: CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA - CBEE / UFPE. 2000.....</i>	10
FIGURA 1.6 – CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO A2, COM FOCO EM CRESCIMENTO POPULACIONAL E USO DE ENERGIA	12
FIGURA.1.7- ESQUEMATIZAÇÃO DOS VENTOS ALÍSIOS E CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA FONTE: MARTINS 2008.....	14
FIGURA 1.8 - ESCALA DE TEMPO E ESPAÇO (SILVA,2003)	15
FIGURA 1.9 - FIGURA ESQUEMÁTICA DOS EFEITOS DE DIFERENTES FATORES LOCAIS (RUGOSIDADE)	17
FIGURA 1.10 TROPOSFERA DIVIDIDA EM DUAS PARTES. FONTE: - STULL (1998).....	19
FIGURA 1.11 – PERFIL VERTICAL DE VELOCIDADE DO VENTO DESDE A SUPERFÍCIE ATÉ A ALTURA DO VENTO GEOSTRÓFICO. O COMPRIMENTO DA RUGOSIDADE (z_0) É A ALTURA ONDE A VELOCIDADE É NULA. FONTE: MARTINS, 2008.	20
FIGURA 1.12 DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE SOBRE COLINAS FONTE: - STANGROOM (2004)	23
FIGURA 3.1 - INTERAÇÕES ENTRE AS PARAMETRIZAÇÕES NO MMS (DUDHIA EL AL 1993)	28
FIGURA 3.2 - REGIÃO NORDESTE ABRANGENDO OS ESTADOS DO CEARA RIO GRANDE DO NORTE, PARAÍBA, PERNAMBUCO, ALAGOAS, SERGIPE	30
FIGURA 3.3 - ÁREA DE ESTUDO (MODELO MICROESCALA)	35
FIGURA 3.4 - TOPOGRAFIA DETALHADA DA ÁREA DE ESTUDO MODELO MICROESCALA	36
FIGURA 4.1 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 METROS PARA (A) FUTURO (2080-2100) E (B) PERÍODO ATUAL (1980-2000)	42

FIGURA 4.2 - VELOCIDADE MÉDIA ANÔMALA DO VENTO (M/S) A 10M DA SUPERFÍCIES ENTRE A SIMULAÇÃO DO CLIMA FUTURO E ATUAL.....	43
FIGURA 4.3 - ENERGIA CINÉTICA INTENSIVA DO VENTO (J/KG) .PERÍODO ATUAL ANÁLISE SAZONAL (A) DEZEMBRO, JANEIRO E FEVEREIRO (B) MARÇO ABRIL E MAIO (C) JUNHO JULHO E AGOSTO (D) SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO	44
FIGURA 4.4 - ENERGIA CINÉTICA INTENSIVA DO VENTO (J/KG) PARA PREDIÇÃO DO MODELO NO FUTURO. PERÍODO SAZONAL (A) DEZEMBRO, JANEIRO E FEVEREIRO (B) MARÇO ABRIL E MAIO (C) JUNHO JULHO E AGOSTO (D) SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO	45
FIGURA 4.5 - ENERGIA CINÉTICA INTENSIVA DO VENTO (J/KG) ANÁLISE SAZONAL (A) DEZEMBRO, JANEIRO E FEVEREIRO (B) MARÇO ABRIL E MAIO (C) JUNHO JULHO E AGOSTO (D) SETEMBRO, OUTUBRO E NOVEMBRO	46
FIGURA 4.6 - ALTITUDE EM METROS PARA A REGIÃO DE ESTUDO	48
FIGURA 4.7 - ENERGIA CINÉTICA INTENSIVA DO VENTO (J/KG) PARA O PERÍODO ATUAL ANÁLISE VERTICAL (A) 10 METROS DO SOLO (B) 50M DO SOLO (C) 80M DO SOLO (D) 100M DO SOLO. ALTURAS EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE DO SOLO	49
FIGURA 4.8 - ENERGIA CINÉTICA INTENSIVA DO VENTO (J/KG) PARA O PERÍODO FUTURO ANÁLISE VERTICAL (A) 10 METROS DO SOLO (B) 50M DO SOLO (C) 80M DO SOLO (D) 100M DO SOLO. ALTURAS EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE DO SOLO	50
FIGURA 4.9 - ENERGIA CINÉTICA INTENSIVA DO VENTO (J/KG) PARA O PERÍODO INVERNO/PRESENTE. ANÁLISE VERTICAL (A) 10 METROS DO SOLO (B) 50M DO SOLO (C) 80M DO SOLO (D) 100M DO SOLO. ALTURAS EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE DO SOLO.....	51
FIGURA 4.10 - PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE NOS PONTOS DE REFERENCIA 1, 2 E 3 DA FIGURA 4.6. MÉDIA ANUAL PERÍODO ATUAL.....	52
FIGURA 4.11 - - PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE NOS PONTOS DE REFERENCIA 1, 2 E 3 DA FIGURA 4.9. MÉDIA ANUAL PERÍODO FUTURO.....	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AL	ATMOSFERA LIVRE
CBEE	CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA
CLA	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA
CLP	CAMADA LIMITE PLANETARIA
CLS	CAMADA LIMITE SUPERFICIAL
CFD	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS
CO₂	DIÓXIDO DE CARBONO
DJF	DEZEMBRO/JANEIRO/FEVEREIRO
EC	ENERGIA CINÉTICA
GCM	MODELOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL
GGE	GASES DE EFEITO ESTUFA
GrADS	GRID ANALYSIS AND DISPLAY SYSTEM
IPCC	INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE
JJA	JUNHO/JULHO/AGOSTO
MAM	MARÇO/ABRIL/MAIO
MM5s	FIFTH-GENERATION NCAR / PENN STATE MESOSCALE MODEL
NEB	NORDESTE DO BRASIL
NOAA	NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
SON	SETEMBRO/OUTUBRO/NOVEMBRO
SRES	SPECIAL REPORT ON EMISSIONS SCENARIOS
ZCIT	ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL

RESUMO

FARIA, Bruno Lopes de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **modelagem do potencial eólico do Nordeste do Brasil sob condições atuais e de aquecimento global: uma interface entre modelos numéricos computacionais de microescala e mesoescala.** Orientador: Flávio Barbosa Justino, Co-Orientadores: Márcio Arêdes Martins e Jose Maria Nogueira da Costa

As fontes de energias renováveis ou limpas, tais como, a eólica, apresenta-se como uma opção para a redução do uso de energia a base de combustíveis fósseis. O Brasil, e em especial o território do nordeste brasileiro, é privilegiado no potencial eólico já que a sua localização abrange a área dos ventos Alísios.. Portanto o presente trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para avaliar o potencial eólico do nordeste brasileiro, e avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a energia cinética intensiva dos ventos. Para esse estudo usou-se dados do modelo climático regional MM5 (Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model) sob condições de período atual (1980-2000) e futuro (2080-2100), com cenário de aquecimento global. Com os dados provenientes do MM5 foi feita a interface com o modelo de microescala, visando modelar os primeiros metros da camada limite atmosférica para a obtenção de perfis verticais de velocidade do vento sobre terrenos complexos, e mapas de potencial eólico em diferentes altitudes. Os resultados mostraram que em um cenário futuro todas as estações do ano apresentaram tendências de intensificação da energia cinética intensiva dos ventos, sendo que as anomalias mais evidentes ocorrem na segunda metade do ano. Isso mostra a viabilidade de aplicação de plantas eólicas nesta região do Brasil tanto para o período atual como para um cenário futuro. Predições dos modelos indicam o período de Junho a Agosto (Inverno), como sendo a época mais significativa de potencial eólico, com valores da energia cinética intensiva variando entre 15 J/kg a 55 J/kg. Os resultados ainda indicaram que o melhor posicionamento de turbinas eólicas bem como a altura das torres, entre 80 e 100 metros do solo. O estudo sugere que a interface entre modelos de diferentes complexidades, bem como a aplicação de diferentes metodologias para o cálculo do potencial eólico, é importante para aumentar a precisão e a confiabilidade das estimativas da capacidade de geração de energia eólica.

ABSTRACT

FARIA, Bruno Lopes de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Modeling the wind power potential in the northeast of Brazil under current conditions and global warming: an interface between microscale and mesoscale numerical models.** Adviser: Flávio Barbosa Justino, Co-Adviser: Márcio Arêdes Martins and Jose Maria Nogueira da Costa

The source of renewed or clean energy, such as, the eolic energy is presented as an option for the reduction of the energy based on fossil fuel. Brazil, and in special the Brazilian northeast region, is privileged in the eolic potential due to the presence of the trade winds. In this sense, the present study consists of developing a tool to evaluate the potential of eolic power as well as to evaluate the impacts of climatic changes on the intensive kinetic energy of the winds. Climate data from the regional model MM5 (Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model) under current (1980-2000) and future global warming conditions (2080-2100) have been utilized. These data served as boundary and initial conditions for a micro-scale model in order to evaluate the role/impact of different surface conditions and topography of the eolic energy. The results show that for the future interval there exist a positive trend leading to an intensification of the kinetic energy of the winds, in particular in the second half of the year. This highlights the viability of application of eolic plants in this region of Brazil for both, the current period and the future. The models simulations also indicate the winter period, as being the time most significant of eolic potential, with values of the intensive kinetic energy varying between 15 J/kg the 55 J/kg. The results still indicate that the optimum positioning of eolic turbines as well as the height of the towers, are between 80 and 100 meters from the soil surface. Finally, our investigation suggests that the interface between models of different complexities, as well as the application of different methodologies for the calculation of the eolic potential, is extremely useful to increase the accuracy of estimates of the local capacity for the generation of eolic energy.

1 INTRODUÇÃO

Há tempos os povos tem percebido a estreita relação entre o homem e o clima. Isto na maior parte das vezes se dá devido a influência de variações climáticas no bem-estar social. Com o incremento das necessidades de consumo associadas ao aumento da população nos últimos 10000 anos, cresceu em consequência a necessidade da geração de energia.

Deve-se notar, todavia, que atrelado ao aumento no consumo de energia desde as épocas mais remotas, cresce em consequência a emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE). O debate internacional especialmente durante os últimos dez anos estabeleceu importantes relações entre o consumo de energia fóssil e suas contribuições para acelerar processos de mudanças climáticas. A convenção do clima das Nações Unidas, que tem como objetivo principal a mitigação dos efeitos nocivos da acelerada emissão dos GEE nos ecossistemas, é a base dos esforços globais para o combate às mudanças climáticas.

A questão energética é um dos tópicos de maior importância na atualidade, já que a qualidade de vida de uma sociedade esta intimamente ligada ao seu consumo de energia. O crescimento da demanda energética mundial em razão da melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento, traz a preocupação com alguns aspectos essenciais para o planejamento energético de todas as economias emergentes. Dentre eles, podemos citar a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento social e econômico de um país e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo de energia (Goldemberg, 2003).

Na década de 70, a alta dos preços do petróleo fez com que houvesse um grande aumento do interesse por alternativas energéticas, principalmente para aplicações específicas. Além disso, os problemas encontrados na operação das centrais nucleares (de segurança, ecológicos, etc.) contribuíram ainda mais para alertar quanto a necessidade de se dispor de outras fontes de energia. Para sanar tais dificuldades, amplas pesquisas foram realizadas no desenvolvimento de tecnologias a serem utilizadas nas fontes renováveis de energia, tornando algumas das alternativas encontradas altamente competitivas. Entre essas “novas” fontes energéticas, destacam-se os ventos.

Denomina-se energia eólica, a energia cinética intensiva contida na massa de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética intensiva de translação em energia cinética intensiva de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aero - geradores, para a geração de eletricidade.

1.1. O Recurso Eólico

Para se tornar competitivo, um país deve dispor de fontes abundantes de energia. É sabido, entretanto, que as fontes de energia tradicionalmente exploradas, tornam-se escassas e de difícil exploração devido a problemas associados ao seu impacto econômico, o que inclui a distância dos centros consumidores, entre outros.

Dessa maneira, é crescente a necessidade de se conhecer as potencialidades energéticas de uma região. Esta necessidade torna-se mais agudo no que se refere às fontes alternativas de energia. Dentre essas, a energia eólica desponta como uma das mais promissoras. Mesmo com recursos mínimos para a pesquisa e com a produção em pequenas quantidades, os custos da geração eólica já atingem, em localidades favoráveis, valores competitivos. Entretanto, os custos totais poderão ser reduzidos com o aumento da produção, pelo aperfeiçoamento técnico e, principalmente, com a identificação precisa de áreas que possuem bom potencial eólico. SILVA(2003)

1.2. Energia Eólica

A energia eólica provém da radiação solar, uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética intensiva dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (Energia Eólica – Princípios e Aplicações, 2006).

No entanto, a energia eólica é um recurso ainda pouco explorado no Brasil. Sua utilização não resulta na emissão de poluentes, e consiste na transformação inicial de energia de movimento do vento para energia mecânica de uma hélice - turbina eólica, e a conseguinte conversão em energia elétrica.

No cenário mundial, a energia eólica tem apresentado um elevado crescimento nos últimos anos, principalmente devido a incentivos governamentais e ao alto grau de desenvolvimento e confiabilidade desta tecnologia (Marques, 2004). Para geração de energia elétrica a partir dos ventos são necessários os seguintes elementos, para compor um sistema eólico:

- Recurso Eólico: ventos;
- Aero-geradores: equipamento eletromecânico responsável pela conversão da energia;
- Consumidor ou Armazenamento.

1.3. O Vento

O vento consiste na circulação de ar na atmosfera oriunda da energia solar. A radiação provoca aquecimento diferencial de porções de ar, criando os gradientes de pressão, geradores dos ventos. Para seu estudo, os ventos podem ser divididos em duas componentes: uma horizontal – Leste-Oeste ou Norte-Sul – e uma componente vertical – para cima ou para baixo. Embora o comportamento vertical seja importante, especialmente para formação das

nuvens, o componente horizontal é muito mais relevante em termos de potencial eólico.

1.4. Custos

Para a implantação de parques ou fazendas eólicas é necessário um espaço físico que permita a instalação de aero-geradores para atender à demanda local e que possibilite suprir, no futuro, o aumento da demanda. A instalação de aero - geradores não impede o uso produtivo da terra, que poderia abrigar atividades agrícolas ou de pecuária, por exemplo, ampliando a oferta de empregos.

Existem três fatores de grande importância na análise da viabilidade econômica do aproveitamento da energia eólica: (1) o regime local dos ventos, (2) o custo da energia produzida por outras fontes concorrentes e (3) os fatores institucionais. Nenhum desses três aspectos pode ser considerado isoladamente e a importância dos fatores institucionais não pode ser desprezada. Em determinados países, a energia dos ventos pode se tornar pouco competitiva comparada com as fontes convencionais porque o alto custo da tecnologia, em conjunto com os baixos preços dos combustíveis fósseis, pode tornar a energia eólica pouco atraente. Entretanto, em muitos países em desenvolvimento, os custos dos combustíveis fósseis, em termos relativos, são elevados, ao passo que o custo da mão-de-obra para a fabricação de turbinas eólicas com tecnologia de ponta é reduzido. Isso altera completamente o balanço e coloca a energia eólica em uma posição mais competitiva.

A figura 1.1 e a Tabela 1 mostram a parcela de custos para a instalação de projetos eólicos. Note que o custo do equipamento (turbina) é mais de 60% do custo de instalação de uma fazenda eólica. A boa determinação de localidades com boa avaliação de potência eólica e o conhecimento do perfil vertical do vento são fundamentais para reduzir drasticamente os custos.

Tabela 1 - Custos iniciais de projetos em energia eólica

Categoria de custos iniciais Do projeto	Fazenda Eólica de médio/grande porte (%)	Fazenda Eólica de pequeno porte (%)
Estudo de viabilidade	menos de 2	1 - 7
Negociações de desenvolvimento	1 - 8	4 - 10
Projeto de engenharia	1 - 8	1 - 5
Custo de equipamentos	67 - 80	47 - 71
Instalações e infra-estrutura	17 - 26	13 - 22
Diversos	1 - 4	2 - 15

Fonte : RETSCREEN,2000

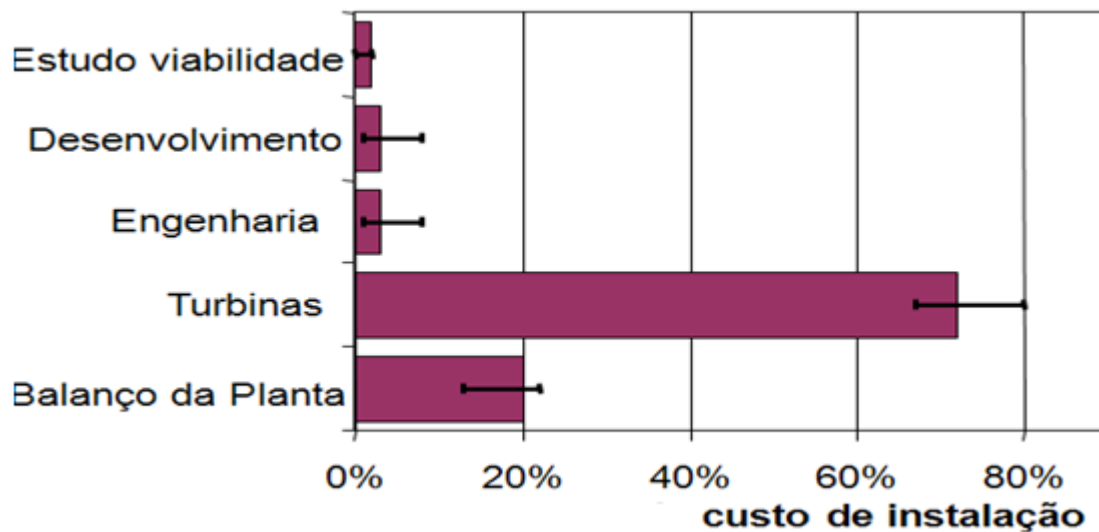


Figura 1.1 Parcela do custo de instalação -Natural Resources (Canada 2009)

As metodologias de projeto e os algoritmos numéricos desenvolvidos para operar com computadores de alto desempenho também têm proporcionado significativas melhorias no projeto da geometria das pás das turbinas eólicas. O projeto das pás deve ser feito com grande precisão para que o aproveitamento da força dos ventos atinja a máxima eficiência, mesmo nos casos de baixas velocidades.

O desenvolvimento de novos materiais, como os compostos de fibra de vidro e carbono semelhantes aos usados nos carros de corrida, também foi decisivo para transformar os antigos cataventos em turbinas de geração de energia elétrica. Segundo os especialistas, esses avançados materiais tornam mais econômica, segura e durável a estrutura das torres.

No momento, as pesquisas estão voltadas ao desenvolvimento de novas pás de rotores e ao aprimoramento das existentes quanto ao uso de materiais e ao desempenho aerodinâmico. Estuda-se ainda a utilização de instalações sem transmissão por engrenagens. Além disso, busca-se o aperfeiçoamento dos procedimentos de operação e manutenção dos sistemas eólicos e espera-se uma maior utilização dos componentes eletrônicos, tendo em vista o aumento da confiança operacional.

Todos os fatores acima mencionados têm contribuído, de forma decisiva, para a redução de custos das instalações para geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da energia dos ventos tornando-a bastante competitiva em áreas com um bom potencial eólico. (SILVA 2003)

1.5. Panorama da Energia eólica no Brasil e no Mundo

A matriz energética mundial tem participação total de 80% de fontes de carbono fóssil, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão e 21% de gás natural. O Brasil se destaca entre as economias industrializadas pela elevada participação das fontes renováveis em sua matriz energética. Isso se explica por alguns privilégios da natureza, como uma bacia hidrográfica contando com vários rios de planalto, fundamental para a produção de eletricidade (14%); soma-se a isto o fato de ser o maior país tropical do mundo, um diferencial positivo para a produção de energia de biomassa (23%). Como discutido por Martins et al. (2005), o planejamento energético a médio e longo prazo necessita de informações confiáveis sobre recursos energéticos disponíveis. A falta de informações sobre a variabilidade, tendências, e fatores que influenciam a disponibilidade de recursos renováveis (ex. solar, eólico), é a principal barreira para a adoção e o investimento no desenvolvimento de projetos de produção de energia. O uso da energia eólica já está bem empregado em países como Dinamarca e Alemanha. A Dinamarca é o país mais expressivo no uso de energia eólica, com 2,9 mil MW instalados, o que representa 25% do seu consumo de energia. *(DUTRA, 2007)

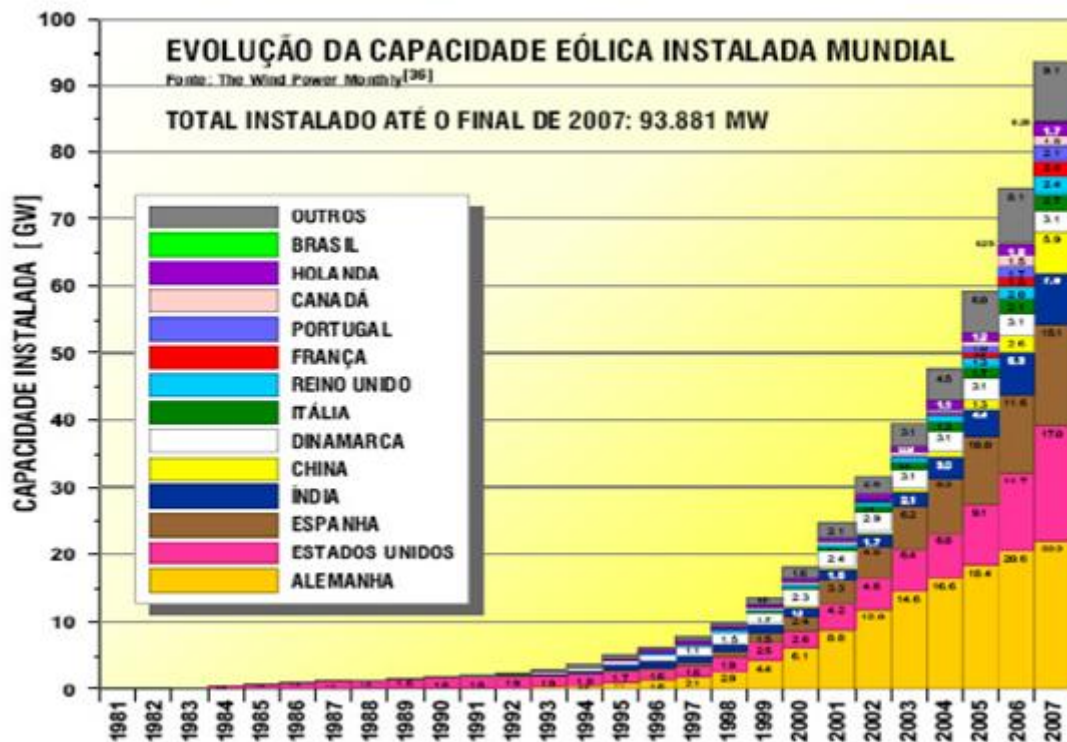


Figura 1.2 - Cenário de energia eólica no mundo até 2007. Fonte ELETROBRÁS 2008

O Brasil possui apenas 20,9 MW instalados, mas tem potencial para 108 mil MW – 36 vezes o potencial da Dinamarca, segundo Pedro Rosas do Centro Brasileiro de Energia Eólica (JORNAL DA CIÊNCIA, NR. 2459 de 5 de fevereiro de 2004).

As usinas mais expressivas estão localizadas no Ceará, com 16,2 MW instalados; ainda, 2,5 MW estão no Paraná e 0,6 MW em Santa Catarina.

Energia Eólica

Distribuição Geográfica do Potencial de Energia Eólica

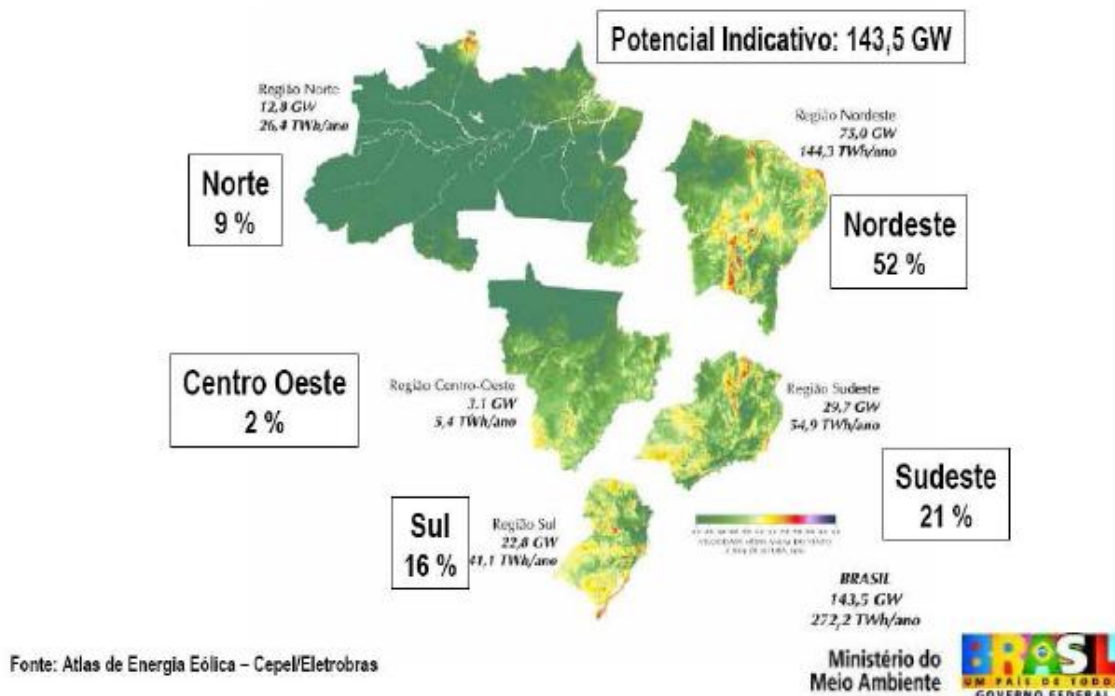


Figura 1.3 Distribuição do Potencial Eólico no Brasil

Estrategicamente o mapeamento das áreas mais propícias a geração de energia eólica é uma necessidade, não só para os países desenvolvidos mas principalmente para os países em desenvolvimento. Estudos desenvolvidos no Brasil demonstram que o país apresenta grande capacidade para a geração de energia eólica (Amarante et al. 2001).

Entretanto, o cenário atual brasileiro não condiz com suas riquezas (figura 1.4). O país, apesar de se destacar mundialmente por utilizar fontes de energia renováveis, concentra grande parte de sua matriz energética na energia hidráulica. A ausência de fontes complementares torna o setor energético vulnerável nos períodos de estiagem. Além disso, inexistente uma infra-estrutura aceitável para o desenvolvimento e exploração eficiente das demais fontes alternativas (VIDAL, 2006).

Em 1987, a CHESF – Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco finalizou um inventário do potencial eólico da região Nordeste, realizado a partir de processamento/análise de registros anemográficos para um período de 5

anos (1977-1981). Também na década de 1980, diversos estudos regionais foram conduzidos para mapeamento eólico de estados brasileiros. Todavia, até o presente não se tem dado o enfoque necessário a investigações dos possíveis impactos que o aquecimento global possa vir a ter na distribuição do potencial eólico de uma dada região. É sabido que uma atmosfera com uma maior disponibilidade de energia estará suscetível a movimentos de ar com maior intensidade, como já tem sido observado principalmente nas regiões tropicais (EMANUEL 2005).

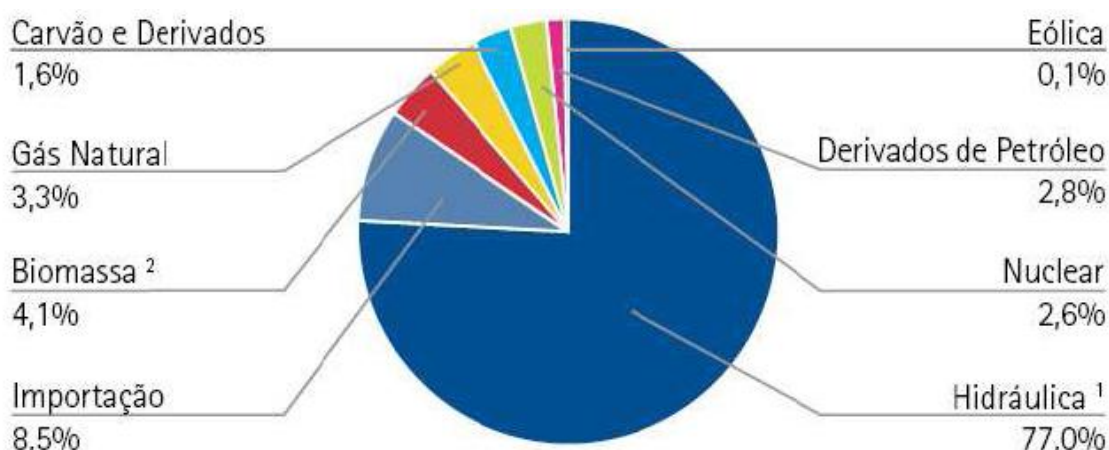


Figura 1.4 Oferta interna de energia elétrica no Brasil por fonte energética. Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional 2008.

O Brasil é uma economia emergente e tem sua matriz energética baseada principalmente na energia hidráulica, a qual representa 77% da oferta interna de energia elétrica (Figura 1.5) (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2008).

A energia eólica poderá também resolver o grande dilema do uso da água do Rio São Francisco no Nordeste (água para gerar eletricidade versus água para irrigação). Figura 1.6

Grandes projetos de irrigação às margens do rio e/ou envolvendo a transposição das águas do rio para outras áreas podem causar um grande impacto no volume de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, conseqüentemente, prejudicar o fornecimento de energia para a região. Entretanto, observando o gráfico abaixo, percebe-se que as maiores velocidades de vento no nordeste do Brasil ocorrem justamente quando o fluxo de água do Rio São Fran-

cisco é mínimo. Logo, as centrais eólicas instaladas no nordeste poderão produzir grandes quantidades de energia elétrica evitando que se tenha que utilizar a água do rio São Francisco.

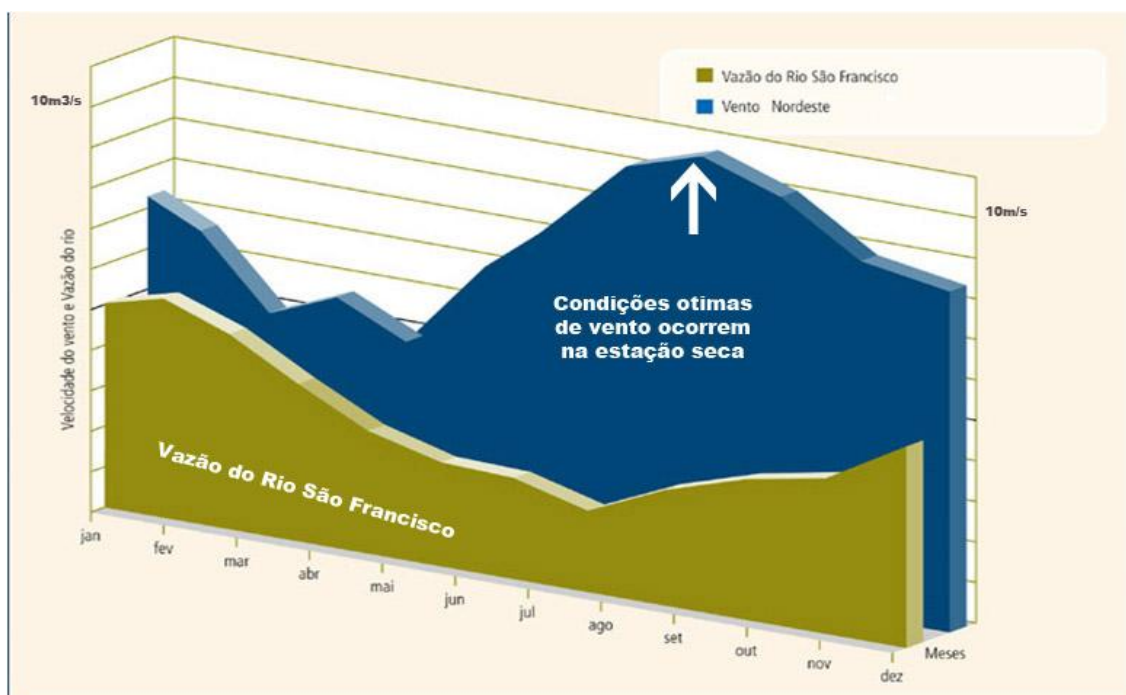


Figura 1.5 - Comparação entre o vazão do Rio São Francisco e o regime de vento no nordeste do Brasil. Fonte: CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA - CBEE / UFPE. 2000

1.5.1 Mudanças Climáticas e seu impacto no potencial eólico

O aquecimento global é motivo de muitas discussões em relação ao seu efeito no clima do planeta, nos níveis dos oceanos, derretimento das calotas polares, entre outros. Para este trabalho, o vento em superfície, o qual é usado como forma de geração não poluente de energia, é o foco principal. Alguns estudos já foram feitos com esse fim, para determinar e compreender o que acontecerá com o regime dos ventos em diferentes regiões do planeta. PES (2009)

Breslow e Sailor (2001), utilizando saídas dos Modelos de Circulação Geral (GCM's) do Canadian Climate Center e Hadley Center, concluíram que haverá uma redução na velocidade dos ventos em superfície para os Estados Unidos da América (EUA). Essa redução será 1,0 a 3,5 % nos próximos 25 anos e de 1,4 a 4,5 % para os próximos 100 anos.

Sailor e Hart (2008) estudaram os efeitos das mudanças climáticas para o nordeste dos EUA. As saídas dos GCM's utilizadas foram extraídas das rodadas padronizadas do IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Os cenários analisados foram o A1B e o A2 (Figura 1.5) , do Relatório Especial sobre os Cenários de Emissões (Special Report on Emissions Scenarios - SRES). Esse estudo mostrou que a velocidade dos ventos na região nordeste dos EUA poderão ter uma redução de 5 a 10 % no verão, enquanto que no inverno essa redução é muito pequena ou até mesmo pode haver um ligeiro aumento no potencial eólico. PES (2009)

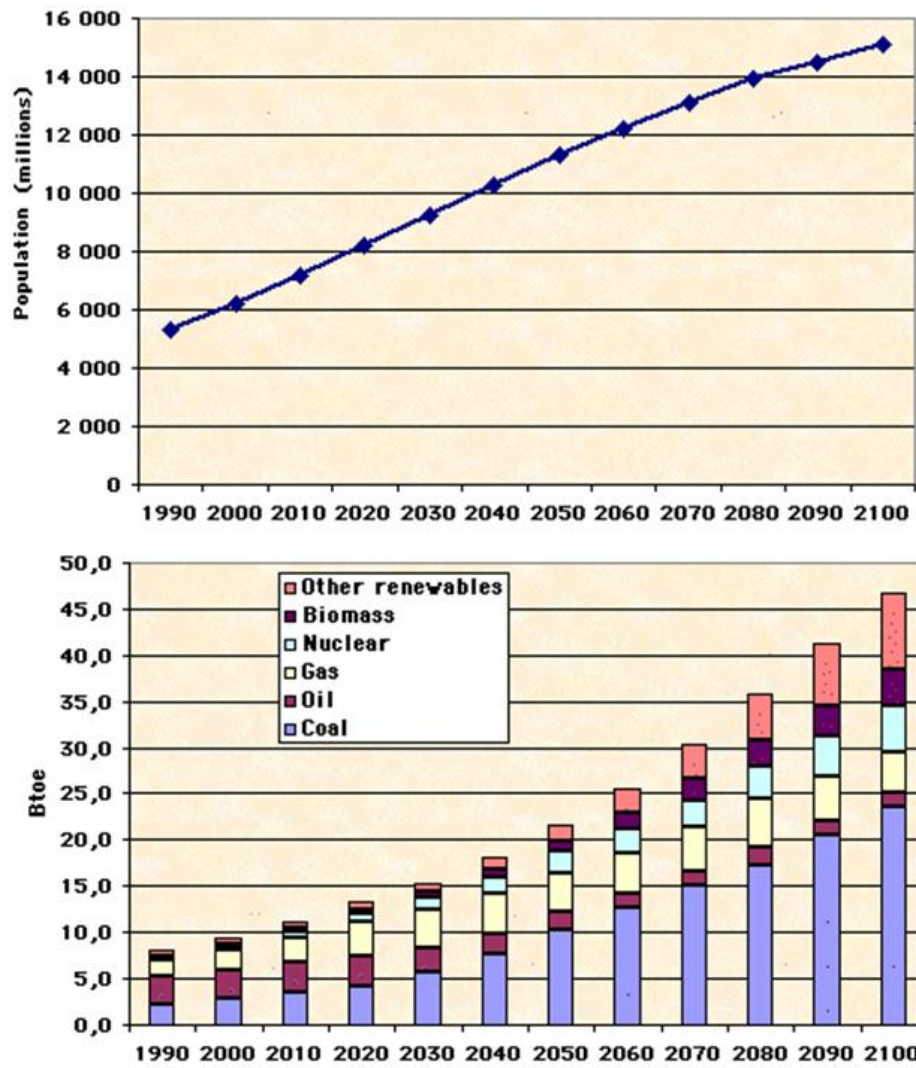


Figura 1.6 – Caracterização do cenário A2, com foco em crescimento populacional e uso de energia

1.6.. Análise – Características De Vento Do Nordeste

1.6.1. Circulação Geral da Atmosférica

Os ventos alísios são conseqüências da rotação da terra. Eles carregam a umidade marítima e são voltados para leste dos continentes, gerando forte precipitação em torno do equador, estando presentes praticamente durante todo o ano nas regiões tropicais. O nordeste do Brasil (NEB) é fortemente influenciado pelos alísios, que oscilam de intensidade e direção entre o oceano e o continente (SILVA, 2002). Os alísios sobre a América do Sul estão relacionados ao centro de alta pressão do Atlântico, e como o mesmo modifica sazonalmente sua posição e intensidade, os padrões destes ventos também se modificam (MUNHOZ, 2008).

A região do tabuleiro costeiro é fortemente influenciada pela circulação de grande escala (ventos alísios) e pelas brisas costeiras (LYRA, 1998). No inverno, a diferença de temperatura oceano-continente diminui e com isso há uma atenuação da brisa marítima e uma maior variabilidade na direção do vento (ROCHA & LYRA, 2000). No NEB, por exemplo, onde os ventos alísios são persistentes e intensos durante todo o ano, quase sempre as brisas apenas contribuem para mudar um pouco a direção e a velocidade dos alísios.

Dependendo da orientação da costa, a velocidade do vento, resultante da superposição alísio-brisa, pode ser maior ou menor que a do alísio (SILVA, 2009). Os ventos alísios de NE (Hemisfério Norte) e SE (Hemisfério Sul) escoam dos trópicos para a zona de convergência intertropical (ZCIT) e forma uma região de ar úmido que envolve as regiões próximas a linha do equador. Os alísios também são responsáveis pela renovação das águas superficiais dos oceanos que afeta (ISHIBA, 2006). Na zona litorânea desde o norte do Brasil até o NEB, os ventos são controlados primariamente pelos alísios de Leste e brisas terrestres e marinhas (AMARANTE, 2001). Esta combinação do efeito de brisa com os alísios de sudeste e nordeste, resulta em ventos médios anuais entre 5 e 7,5 m/s no litoral norte do Amapá e Pará, e entre 6 a 9 m/s em sua parte sul, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e R. G. do Norte (SILVA, 2009).

Para o litoral, os ventos alísios favorecem a penetração da brisa marítima no continente durante todo o ano com destaque para o inverno períodos de máxima dos alísios de sudeste. Nessa época as maiores intensidades de potência eólica encontram-se no interior do continente (BANDEIRA, 1990). O regime de vento conhecido como “contra-alísio” refere-se a um vento seco, que em geral está associado a uma calmaria na faixa tropical, soprando do equador para os trópicos. Forma-se em consequência do aquecimento do ar atmosférico junto à região equatorial, e devido as suas propriedades físicas, dissipam as nuvens e ocasionam céu claro. A maioria dos desertos do planeta está situada em regiões que são cruzadas por estes ventos, que oscilam entre 10°N e 5°S (ISHIBA, 2006). A Figura 1.7 ilustra a distribuição dos Alísios no Globo e as células de circulação atmosférica.

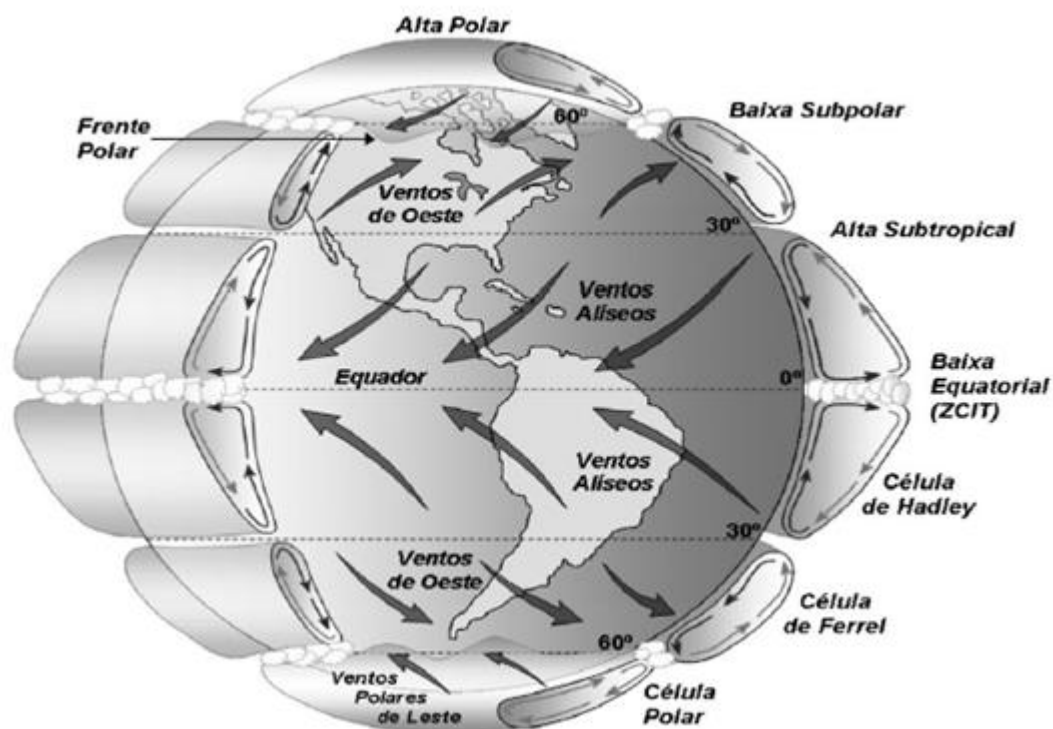


Figura.1.7- Esquematização dos ventos alísios e circulação geral da atmosfera FONTE: MARTINS 2008.

1.6.2.. Escalas De Espaço

A superfície terrestre exerce um importante papel no comportamento dos ventos. O perfil eólico de uma região é condicionado significativamente por fenômenos climáticos próximos a superfície. Estes fenômenos resultam em condições de vento localizadas que se afastam das características gerais da Circulação Geral Atmosférica. Desta forma, os movimentos atmosféricos são governados por sistemas climáticos associados a diferentes escalas de tempo e espaço. Estas escalas dependem, fundamentalmente, das condições geográficas do local. A figura 1.8 ilustra alguns exemplos de fenômenos atmosféricos, apresentando suas causas mais comuns e diferenciando-os nas várias escalas de tempo e espaço.

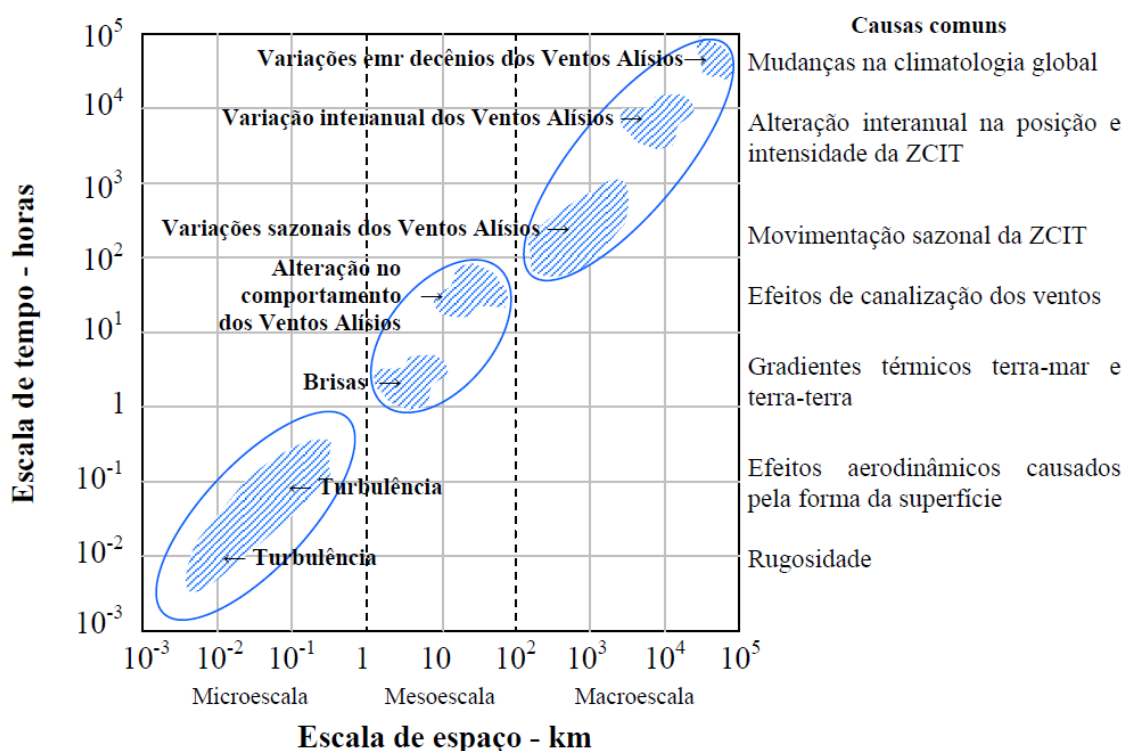


Figura 1.8 - Escala de tempo e espaço (SILVA,2003)

1.6.3. Escala regional ou Mesoescala

Nas latitudes que cobrem o Nordeste do Brasil, o regime de vento é fortemente condicionado pela circulação em macro-escala dos ventos alísios. Entretanto, o comportamento desses ventos é afetado pela presença dos continentes e de suas particularidades climáticas e orográficas. A privilegiada localização geográfica dos estados do Nordeste imputa características excepcionais à meteorologia eólica regional. Uma vez que o fluxo de ar prevalece de uma extensa cobertura oceânica (livre de obstáculos). Os efeitos de meso-escala no litoral nordeste estão, quase que totalmente, ligados a interação dos ventos alísios nas camadas atmosféricas de baixos níveis.

1.6.4.. Escala local ou Microescala

As características eólicas do Nordeste são influenciadas significativamente por eventos climáticos de micro-escala, resultando em condições localizadas que muito diferem das características gerais da circulação em macro-escala e meso-escala (WMO, 1981). Muitos fatores inerentes a um determinado local podem afetar o comportamento dos movimentos atmosféricos e são chamados de “Fatores Locais”. Os principais fenômenos de micro-escala observados na região Nordeste são decorrentes da contínua geração de vórtices devido à fricção do vento sobre a superfície. A presença dessas forças de fricção faz com que a velocidade do vento diminua à medida que se aproxima do solo, induzindo o surgimento de um perfil vertical de velocidade. Este gradiente vertical produz fortes variações de alta frequência na velocidade do vento. Estas variações, também chamadas de turbulências atmosféricas, se apresentam em escalas de tempo inferiores a hora, podendo chegar a segundos. Quando o fluxo de ar passa sobre uma variedade de superfícies, cada uma delas influencia de maneira diferenciada o comportamento do fluxo. A intensidade desta influência vai depender das condições topográficas e de cobertura do solo.

Resumidamente, os principais mecanismos de micro-escala podem ser agrupados em três grandes conjuntos: 1. Fenômenos aerodinâmicos relacionados a topografia do local (como elevações ou depressões isoladas, serras e pequenas chapadas) e a obstáculos naturais ou artificiais (como cadeias de árvores ou construções); 2. Fenômenos associados a mudanças na rugosidade dentre duas ou mais superfícies. Estes produzem efeitos de menor dimensão que os do primeiro conjunto; 3. Fenômenos relativos às variações do fluxo de calor no cruzamento do limite entre duas superfícies de características diferentes. A figura 1.9 esquematiza uma variedade de fatores locais que influenciam o vento.

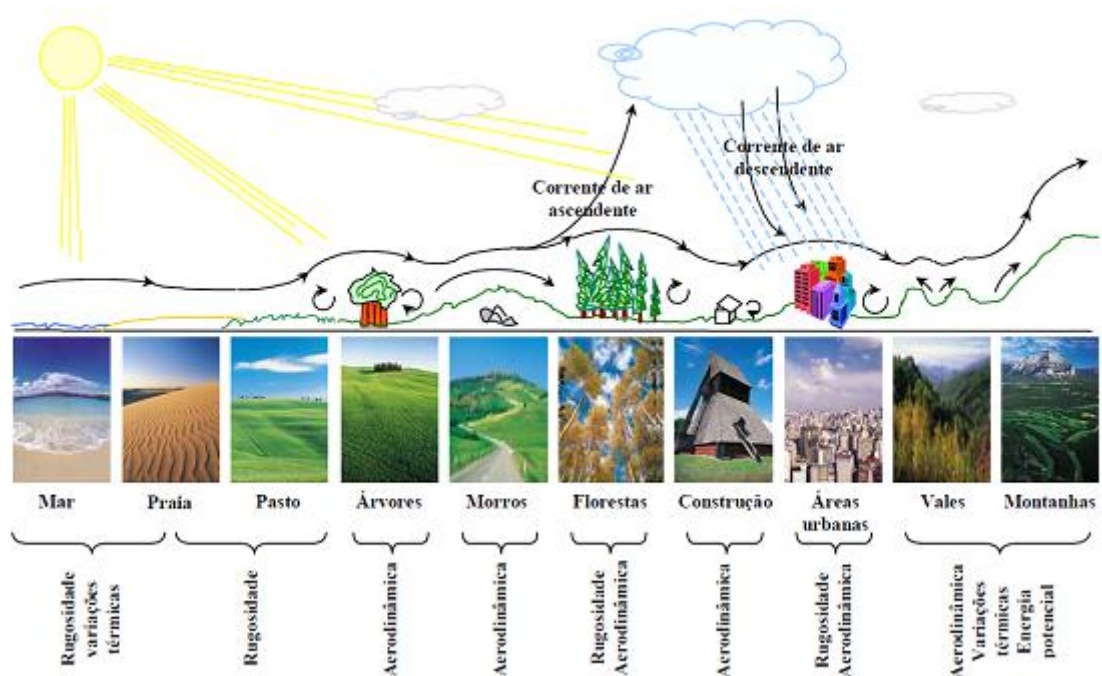


Figura 1.9 - Figura esquemática dos efeitos de diferentes fatores locais (rugosidade)

O ar modificado pelo fluxo sobre diferentes formas (por efeitos aerodinâmicos) e mudanças na rugosidade da superfície é chamado de Camada Limite Interna. Quando ocorrem variações no fluxo de calor no cruzamento entre duas superfícies, o ar modificado é chamado de Camada Limite Interna Térmica. A definição de camada limite interna advém do fato desta nova camada limite sempre se posicionar entre a superfície e a camada limite atmosférica (CLA). Estudos detalhados das características eólicas em micro-escala são

fundamentais, pois subsidiarão o entendimento correto da interação vento/solo. Estes estudos propiciam a definição de uma base de informações para que se estabeleçam as condições de vento sob as quais as turbinas eólicas irão funcionar, suportando os fortes carregamentos produzidos pelas turbulências de vento

1.7.. Rugosidade aerodinâmica da superfície e lei logarítmica do vento

Nos níveis atmosféricos mais baixos, as aproximações de vento geostrófico e de vento gradiente não podem mais ser aplicadas, devido a modificações no equilíbrio de forças promovidas pelo atrito oferecido pela superfície. O relevo e a presença de obstáculos moldam o escoamento do ar sobre a superfície terrestre, bem como geram turbulências no fluxo. A rugosidade da superfície é a propriedade física que descreve a ação da superfície terrestre na redução do momento e na absorção do impacto dos ventos. Define-se a camada limite atmosférica como a região compreendida entre a superfície e uma altura variável entre 100 e 3000 m de altura e que apresenta um comportamento diferente do restante da atmosfera devido às interações superfície-atmosfera. A influência da superfície é especialmente dominante na camada superficial, compreendendo os primeiros 50-100 m da atmosfera, onde ocorrem os intercâmbios de momento, calor e umidade entre a superfície e o ar atmosférico (MARTINS, 2008).

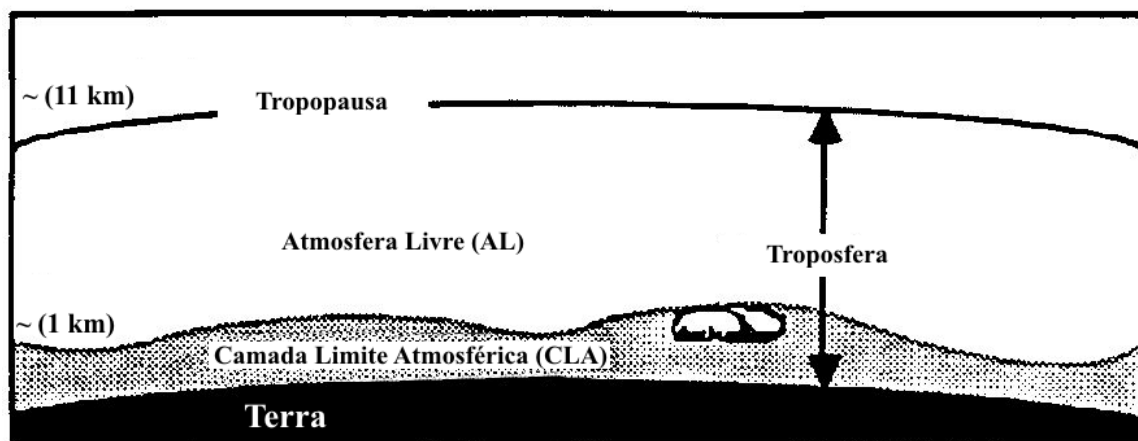


Figura 1.10 Troposfera Dividida em duas Partes. Fonte: - Stull (1998)

A rugosidade da superfície ocasiona a redução da velocidade do ar e, portanto, da intensidade da força de Coriolis, já que esta é proporcional ao módulo da velocidade. Conseqüentemente, o vento deixa de escoar paralelamente às isóbaras, como descrito anteriormente para o escoamento em altos níveis. Nas proximidades da superfície, o vento apresenta uma componente no sentido da força do gradiente de pressão. Dessa forma, o

escoamento ciclônico converge em direção à baixa pressão, enquanto nos anticiclones o ar diverge, afastando-se do centro de alta pressão. A convergência de ar provoca movimentos ascendentes sobre os centros de baixa pressão, ocasionando instabilidades e possibilitando formação de nuvens e chuva. Nos centros de alta pressão ocorrem movimentos descendentes de ar, e normalmente o tempo é bom e estável (MARTINS, 2008). Além do comportamento turbulento devido às interações superfície-atmosfera, outro aspecto importante a ser considerado é o cisalhamento do vento. A velocidade do vento é nula a alturas próximas à superfície e aproximadamente geostrófica na atmosfera livre. Na camada superficial observa-se um perfil vertical aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade do vento, como apresentado graficamente na Figura 1.11 (MARTINS, 2008).

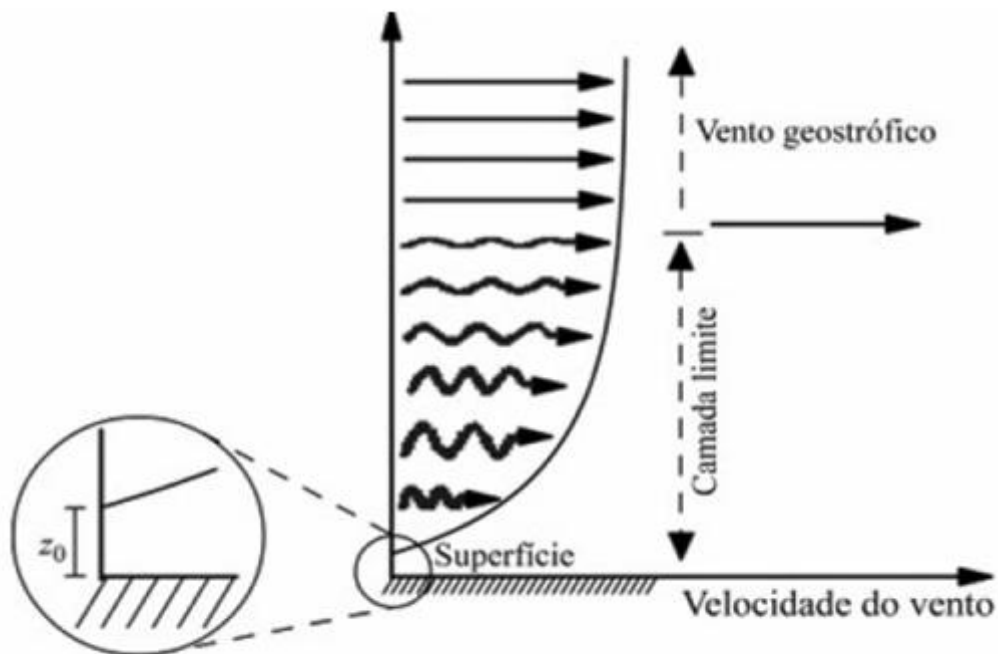


Figura 1.11 – Perfil vertical de velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento da rugosidade (z_0) é a altura onde a velocidade é nula. FONTE: MARTINS, 2008.

Prandtl em 1932 desenvolveu a seguinte expressão logarítmica empírica para a variação da velocidade do vento na vertical em uma camada limite turbulenta.

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Em que a variação da velocidade com a altura vertical z , é dada em função da velocidade de fricção (u^*), da constante de Von Karman (k), e do comprimento de rugosidade (z_0). O comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero, e depende do relevo e obstáculos da superfície. Contudo, o perfil real de velocidades na vertical depende também da estratificação de temperatura e pressão na atmosfera (MARTINS, 2008). A lei logarítmica para o perfil de vento só é válida para condições de neutralidade atmosférica. A velocidade de fricção da equação do vento representa a velocidade de escoamento de um fluido como o ar atmosférico. Ela significa uma combinação entre as propriedades do fluido e aquelas do meio sobre o qual ele escoar. Trata-se de um importante parâmetro do ponto de vista aerodinâmico e, também, para o cálculo de fluxos energéticos e de momentum (DOS SANTOS, 2001; SUTTON, 1977)

1.8 - Camada Limite Superficial (CLS)

Na camada limite superficial, o vento é fortemente influenciado pelo gradiente de pressão e pela superfície terrestre. Essa camada fica em contato direto com o solo e pode variar entre alguns centímetros a dezenas de metros, correspondendo a aproximadamente 10% da CLA (STULL, 1988). As variações mais acentuadas das variáveis meteorológicas com a altura ocorrem dentro desta camada e, conseqüentemente, a ocorrência das trocas mais significativas de momentum, calor, massa e também de gases traços. Os primeiros milímetros da CLS logo acima do solo são chamados de Camada Interfacial (CI). Esta camada tem sua espessura com forte dependência do tipo de superfície, e o seu

transporte molecular é o mais significativo quando comparado aos níveis superiores.

Acima da Camada Interfacial ocorrem fluxos verticais turbulentos de calor de e momentum. Os fluxos turbulentos e a fricção apresentam pouca variação com a altura, considerando-se, em média, um decréscimo de 10% de sua magnitude no topo da camada (STULL, 1988). Grandes variações com a altura da temperatura, umidade e cisalhamento do vento, fazem com que as trocas turbulentas sejam mais intensas nesta camada (ARYA, 1988). Próximo da superfície terrestre predomina a turbulência mecânica. À medida que a altura aumenta, a convecção torna-se a principal causa da turbulência. Na camada limite superficial, a estrutura do vento é condicionada pela natureza da superfície e pelo gradiente vertical de temperatura do ar.

1.9 escoamento sobre Colinas e a Interferência na CLA

Os fenômenos de escoamento atmosféricos relacionados com turbinas eólicas são mais eficientes em regiões de terreno plano, onde o perfil de vento é completamente desenvolvido e bem compreendido. Como essas regiões são menos encontradas na prática, os projetistas têm que considerar regiões mais complexas onde colinas estão presentes. A influência de colinas pode ser benéfica ou maléfica na disponibilidade da energia com o aumento de velocidade do escoamento no topo da colina.

A figura 1.12 mostra um diagrama esquemático do desenvolvimento do perfil de velocidade sobre a colina. Se a colina é grande o bastante, $h=500\text{m}$, para perturbar toda a CLA, então as forças de empuxo afetam o fluxo a qualquer hora do dia. Para colinas muito menores que a CLA, $h = 100\text{m}$, as forças de empuxo somente são importantes quando a CLA possui estratificação estável. Colinas com uma escala de comprimento da ordem de quilômetros estão livres de efeitos de empuxo durante a maior parte dos dias, quando os ventos são fortes (Stangroom, 2004). Como os comprimentos de escalas de colinas estão abaixo de 10km, a força de Coriolis também pode ser ignorada (Kaimal e

Finnigan, 1994).

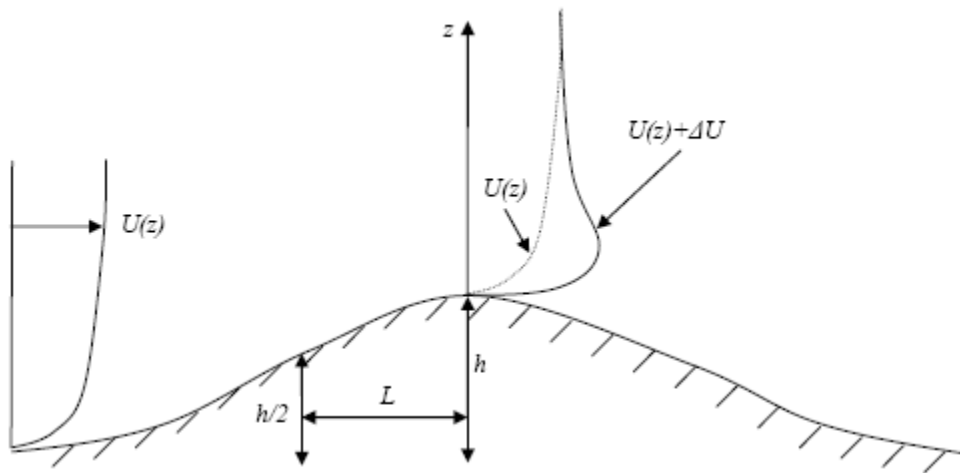


Figura 1.12 Desenvolvimento do Perfil de Velocidade Sobre Colinas Fonte: - Stangroom (2004)

A figura 1.12 mostra as mudanças no perfil de velocidade vertical em uma colina, onde o vento sofre acréscimo de velocidade ΔU . Outro detalhe mostrado nesta figura é o comprimento característico, L , proposto por Jensen et al. (1984). Segundo (Stangroom, 2004), diversos autores estudaram zonas de recirculação na região a montante e a jusante da colina, mostrando que ocorre uma desaceleração leve no início da colina, causando uma pequena zona de separação se a colina for bastante íngreme. O escoamento acelera até o topo da colina onde são encontradas velocidades máximas. O escoamento logo desacelera no declive a jusante do topo da colina. Se a colina for bastante íngreme, uma grande zona de separação é formada na região de sotavento da colina, podendo gerar um escoamento oposto ao preferencial, causando assim uma desaceleração ainda maior no escoamento. A altura e comprimento desta zona de recirculação dependem da forma da colina. (MOREIRA 2007)

1.10 - A Física da Energia dos Ventos

Neste tópico, serão feitas algumas considerações com relação ao aproveitamento do vento para a geração de eletricidade. A potência contida no vento pode ser considerada a energia cinética intensiva de uma determinada massa m de ar passando através de uma área em um dado intervalo de tempo.

$$E_C = \frac{1}{2} V^2 \quad (1.1)$$

Onde V é a magnitude do vento, obtido através de suas componentes zonal e meridional, da seguinte forma:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1.2)$$

Onde os pares (u, v) são as componentes do vetor vento, sendo u a velocidade zonal e v meridional, ambas em m/s e medidas a 10 metros da superfície. A energia contida no vento, ou seja, a energia cinética intensiva média em um intervalo de tempo, é um ótimo indicativo de potencial eólico, sugerindo o quão favorável é a área em termos de geração de energia elétrica provenientes da energia cinética dos ventos

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o potencial eólico sob duas condições climáticas, cenário atual e de aquecimento global, fazendo uso de dois conjuntos de modelos matemáticos, a saber: 1) o modelo climático regional MM5 e 2) duas aproximações de modelos de microescala. Espera-se ao final do projeto dispor de uma análise sistemática e detalhada do potencial eólico do nordeste brasileiro, bem como dos possíveis efeitos das condições climáticas anômalas (aquecimento global) no ganho/perda da matriz energética brasileira no que tange a energia eólica.

2.1.1 . Objetivos Específicos

Mapear e estimar o potencial para geração de energia eólica na região nordeste do Brasil, utilizando dados de um modelo de clima regional (MM5), visando oferecer orientações para futuras instalações de parques eólicos como gerador de energia renovável seguindo um modelo sustentável.

Fazer a interface entre modelos de micro e mesoescala. Sendo possível a comparação das estimativas do potencial eólico baseado em modelos de diferentes complexidades: Modelos Regionais de Clima e Modelos de Turbulência (microescala).

Modelagem da camada limite atmosférica visando à obtenção de perfis verticais de velocidade do vento sobre terrenos complexos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo proposto que visa investigar o potencial eólico do Nordeste brasileiro com base em um modelo regional de clima bem como em um modelo de microescala (turbulência). Conduzido-os sob duas condições climáticas: atual e sob um cenário de aquecimento global. Sendo as simulações realizadas no Laboratório de mecânica dos fluidos da UFV Seguem o detalhamento sobre os modelos utilizados e seus respectivos domínios de estudo.

3.1. Descrição do Modelo Regional (MM5)

O modelo MM5 (Figura 3.1), cuja descrição detalhada pode ser encontrada em Dudhia *et al.* (2004) e Grell *et al.* (1994) é um modelo de simulação numérica desenvolvido no final da década de 70 pela (Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research Fifth Generation Mesoscale Model). Atualmente se encontra na 5a. geração e possui como características principais a capacidade de múltiplos aninhamentos de grade, dinâmica não hidrostática e assimilação de dados em 4 dimensões, além de várias parametrizações físicas e portabilidade em diversas plataformas computacionais, incluindo o ambiente LINUX. O MM5 utiliza um sistema de

coordenadas sigma que segue a topografia do terreno e resolve às equações de Navier-Stokes em três dimensões, a equação da continuidade, a 1ª. Lei da Termodinâmica e a equação de transferência radiativa.

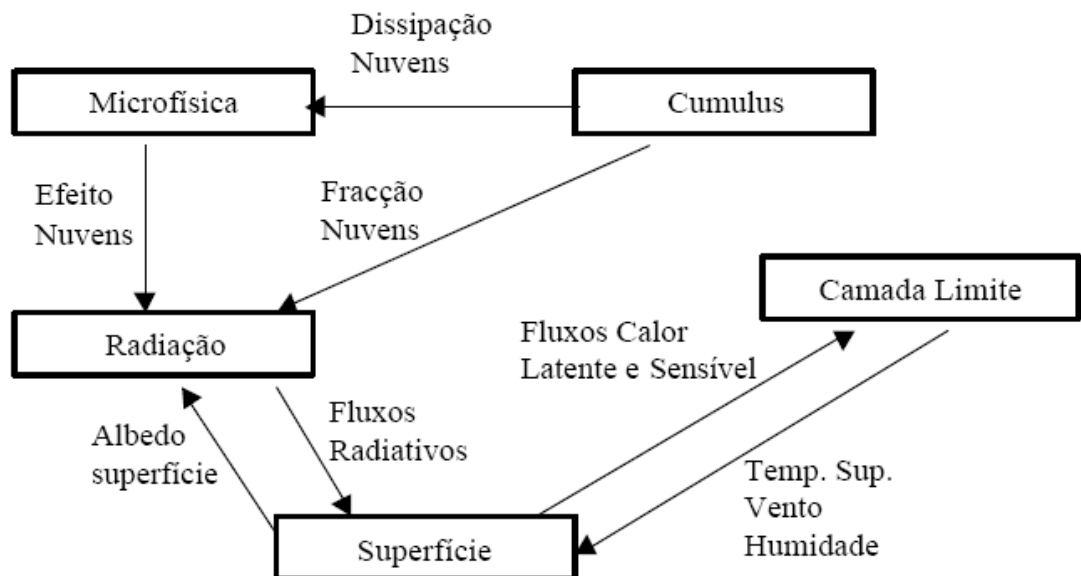


Figura 3.1 - Interações entre as parametrizações no MM5 (Dudhia et al 1993)

Numa breve descrição a simulação inclui: Parametrização de cumulus de Kain-Fritsch (Kain and Fritsch (1993)), a parametrização de cumulus raso de Dudhia and Stauffer (1999), e o esquema planetário da camada de limite de “Medium-Range Forecast”(MRF, Hong and Pan (1996)). O gelo da nuvem é incluído usando “o esquema do gelo simples”. A resolução horizontal é de 60 quilômetros , com 24 - níveis verticais de 55S a 12N, e 28W a 92W. Este domínio permite que a temperatura do mar perto do continente influencie o clima dentro do modelo regional, e coloca os limites laterais quase exclusivamente sobre os oceanos. Isto é importante porque desta forma é possível introduzir as condições dos modelos globais que refletem condições em grande escala. A parametrização do modelo da superfície continental (LSM) acopla os processos/fluxos de superfície à atmosfera (Chen and Dudhia, 2001).

3.2. Área de estudo (Modelo Regional)

A região de estudo abrange parte do nordeste brasileiro, localizado entre as latitudes 12° e 2° S e longitudes 42° e 34 ° W, composta pelos estados do Ceara (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE), (Figura 3.1), e possui uma área com mais de 1.000.000 km² – segundo levantamento do IBGE de 2000 – é banhada pelo Oceano Atlântico na costa leste. As altitudes variam desde o nível do mar até altitudes medias de 1000m no planalto da Borborema.

A partir dos dados provenientes do MM5, para duas situações climáticas distintas denominadas: período atual (1980-2000) e futuro (2080-2100) sob condições enriquecidas com gases de efeito para simulação de aquecimento global. Série de dados de vento do período atual validados por CARDOSO (2009) com reanálises do ERA-40.

A região foi escolhida devido o constante fluxo “combustível” vento. A qualidade se explica em termos de velocidade de vento, baixa turbulência e uniformidade sem rajadas. A privilegiada localização geográfica dos estados do Nordeste imputa características excepcionais à região. Isto deve-se ao fato do fluxo de ar prevalecer em uma extensa cobertura oceânica (livre de obstáculos), de continuidade e constância dos ventos alísios.

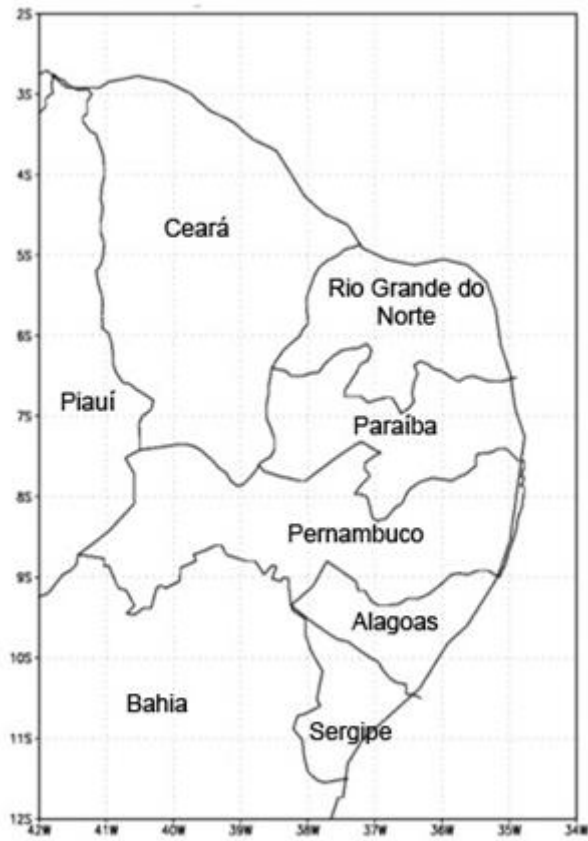


Figura 3.2 - Região Nordeste abrangendo os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Piauí

3.3. Modelo Numérico de Microescala

O interesse no uso de modelos de micro-escala está relacionado a capacidade que estes modelos possuem de lidar com altos valores do número de Reynolds presentes na camada limite atmosférica (CLA). A CLA pode ser definida como uma fina camada adjacente a superfície da terra (1 a 2 km), em que o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds. As direções horizontais são associadas às condições de contorno de tal forma que, para cada variável primitiva A , tem-se:

$$A(x + m Lx, y + n Ly, z) = A(x, y, z) \quad (3.1)$$

em que, Lx e Ly são as dimensões do domínio nas direções x e y , respectivamente, m e n são números inteiros positivos ou negativos. Esta forma de representar as condições de contorno é adequada para a simulação de escoamentos, em que as condições de entrada e saída do domínio são predominantemente turbulentas e desenvolvidas. A definição do domínio de cálculo deve incluir distâncias suficientes a partir da região de interesse, de tal forma que seja garantido o desenvolvimento do escoamento, a partir do ponto em que este atravesse as fronteiras Lx e Ly . O contorno superior do domínio será prescrito acima da camada limite atmosférica, ou seja, acima de 500 m da superfície da CLA. Nesta altitude, o escoamento é considerado estável o suficiente para que a condição de Neumann possa ser imposta a todas as variáveis do escoamento.

A relevância deste contorno se deve ao fato da produção mecânica da turbulência ser decorrente da ação de forças de arraste sobre a superfície e, ainda, devido o fato dos fluxos de calor responsáveis pelos movimentos convectivos serem originados da superfície. As transferências entre campos escalares e quantidade de movimento entre o escoamento e a superfície são descritas por equações de transferências instantâneas.

Tomando como condições iniciais os dados de vento simulados com o modelo regional MM5 para as duas épocas, as equações médias de Navier-Stokes com condições de contorno nos modelos de turbulência serão resolvidas numericamente por meio do método de volumes finitos em malhas híbridas e não estruturadas.

As equações da continuidade e da quantidade de movimento são descritas como:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(V \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (3.3)$$

em que U_i e U_j são as velocidades médias e de flutuação, respectivamente, p é a pressão, ρ é a densidade, e V é a viscosidade cinemática. O tensor de Reynolds ($-\overline{u_i u_j}$) pode ser expresso de diversas formas, e as equações resultantes para este tensor permitem o acoplamento dos modelos de turbulência nas equações de conservação da quantidade de movimento.

Apesar de muitos modelos atmosféricos serem definidos para regime transiente, o modelo proposto é considerado em regime permanente. Esta consideração é justificada pela elevada escala de tempo característica do desenvolvimento das condições atmosféricas em relação as escalas de tempo características do escoamento de vento em baixas altitudes. No presente trabalho, as forças de Coriolis e de empuxo são desconsideradas. O principal interesse consiste no escoamento sobre uma topografia, em altitude inferior a cinco quilômetros. Desta forma, as forças relacionadas com os efeitos de solo sobrepõem as força de Coriolis.

A rugosidade da topografia e a classe de estabilidade são parâmetros que influenciam grandemente o estado da atmosfera. Estes parâmetros são inclusos

no modelo por meio das condições de contorno. As condições de contorno de entrada para a velocidade do vento, a energia cinética intensiva e a taxa de dissipação são especificadas na entrada do domínio, como condições de Dirichlet. Estes perfis foram determinados por Ulden and Holtslag (1985) e incluem a classe de estabilidade, expressa pelo comprimento médio de Obukov e a rugosidade da topologia.

As equações de conservação serão resolvidas pelo programa CFX. Este programa utiliza o esquema de volumes finitos em malhas híbridas. O acoplamento pressão velocidade nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento é efetuado por meio de funções de interpolação de quarta ordem nas equações discretizadas, o que evita oscilações espúrias do campo de pressão, usuais em esquemas co-localizados. O método é similar aquele utilizado em Rhie and Chow (1983), com um número significativo de extensões, o que aumenta a robustez da discretização em situações em que ocorram variações abruptas de pressão. O software possui, resumidamente, as seguintes características:

- discretiza as equações de conservação pelo método de volumes finitos centrado no vértice;
- resolve problemas laminares e turbulentos tridimensionais;
- utiliza malhas não-estruturadas e híbridas;
- resolve problemas conjugados de calor e escoamento do fluido; e,
- possui modelos para transmissão de calor por radiação.

As características supracitadas proporcionam atrativos únicos e suficientes para a solução dos escoamentos geofísicos em pequenas escalas. A utilização de malhas não-estruturadas compreende uma das maiores vantagens do software. Por meio deste tipo de malha, refinamentos de malha serão aplicados próximos às superfícies, onde grandes variações de velocidade e temperatura estão presentes. O CFX 11 funciona com três subsistemas distintos: CFX Build; CFX Solver; e, CFX Post. O CFX Build é a primeira instância evocada, sendo utilizado para a definição da geometria do problema de interesse, do domínio de cálculo, do domínio fluido e respectivas propriedades, das condições iniciais e de contor-

no e geração da malha. O CFX Solver é iniciado após a completa definição do domínio. Neste subsistema, os parâmetros de solução das equações algébricas discretizadas são definidos e a solução numérica segregada das equações é iniciada.

Os resultados são, a princípio, armazenados em arquivos binários para utilização posterior no próximo subsistema. O CFX Post é um pos-processador utilizado para visualizar e analisar os dados da simulação, proveniente do CFX Solver. Neste processador, possível visualizar campos vetoriais, isocurvas e linhas de corrente, em espaços bi e tridimensionais, dentre outras.

No estudo do escoamento geofísico, o procedimento inicial é gerar o domínio de cálculo. No CFX (Build), um domínio tridimensional é definido por meio da associação de diversas superfícies em um sólido..

3.4 Modelo de Turbulência

Moreira (2007) verificou que o modelo de turbulência com melhores resultados para este tipo de escoamento foi o modelo RNG $k-\varepsilon$. Ele utiliza a viscosidade turbulenta (μ_t), em conjunto com duas equações de transporte da energia cinética intensiva turbulenta, k , e da dissipação desta energia, ε . Neste modelo não são considerados os efeitos térmicos, os efeitos transientes e nem a rotação da terra. Este modelo, embora simplificado da condição térmica, é bastante robusto e capaz de prever os escoamentos geofísicos com considerável acurácia.

Detalhes deste modelo podem ser encontrados em Valle (2005) e CFX (2004).

3.5 Área de estudo (modelo microescala)

Para o modelo de microescala, foi escolhida uma região dentro do domínio do modelo regional localizada entre as latitudes 4° e 5° S e longitudes 40° e 41° W, (quadrado vermelho na fig. 3.2) em análises preliminares notou-se que esta é uma região de destaque no que tange a velocidade dos ventos e conseqüentemente ao potencial para a geração de energia eólica.

Outra característica interessante da região selecionada é sua topografia rugosa (Figura. 3.3), onde o modelo numérico será capaz de reproduzir o escoamento sobre colinas e terrenos complexos. A visualização do comportamento espacial (Figura 3.4), foi feita através de uma matriz de dados (latitude, longitude e altitude) provenientes do NOAA Satellite and Information Service

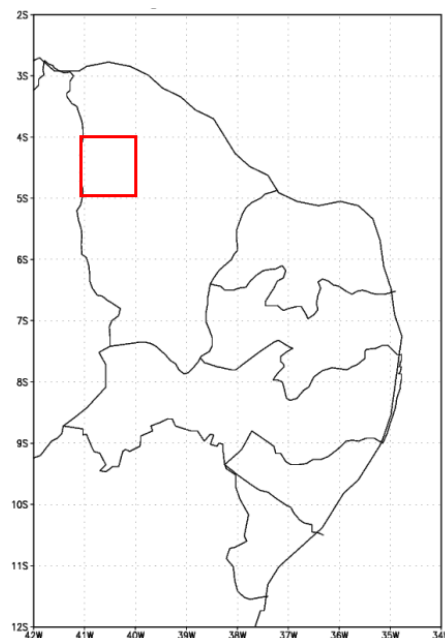


Figura 3.3 - Área de estudo (modelo microescala)

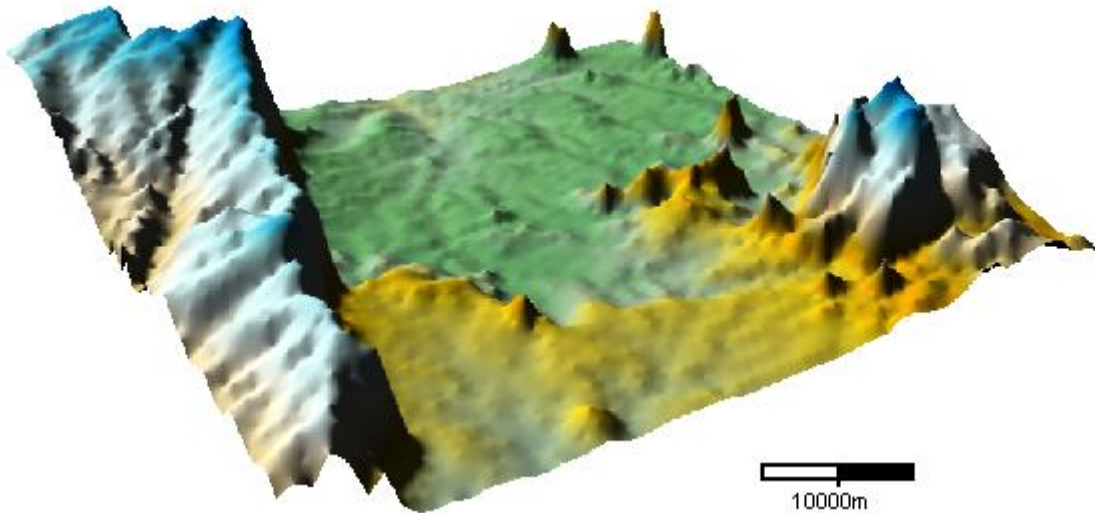


Figura 3.4 - Topografia detalhada da área de estudo modelo microescala

3.6 Condições de Contorno Utilizadas

As condições de contorno tendem a limitar o comportamento do fluido no domínio, onde são apresentadas condições de entrada, saída, do solo (parede), da atmosfera (simetria), e uma forma de se captar um dos fenômenos de instabilidade através da variação da massa específica pelo número de Froude. As condições de contorno utilizadas neste trabalho são as mesmas implementadas por Valle et al. (2005). Neste trabalho o modelo de turbulência utilizado é RNG k- ϵ , onde o perfil de velocidade na entrada (inlet), associado à energia cinética intensiva turbulenta, k , e sua taxa de dissipação, ϵ , são expressos pelas seguintes equações:

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3.4)$$

onde $u(z)$ é a função da velocidade dada pela lei de perfil de velocidade logarítmica apresentada no capítulo anterior, u^* é a velocidade de fricção e

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.5)$$

k é a constante de von Karman ($k = 0,41$):

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{kz} \quad (3.6)$$

onde C_μ é uma constante empírica. A velocidade de fricção é difícil de determinar e não tem um significado físico de fácil compreensão (Valle et al., 2005), pode-se obter uma expressão semelhante em função de uma velocidade de referência, medida diretamente em campo a uma altura de referência de 10 metros. Esta altura é utilizada como referência em todos os trabalhos da literatura. Desta forma, considera-se a velocidade de fricção dada a partir da Eq. 3.4 e 3.7 tem-se:

$$ku(z) = u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.7)$$

Onde:

$$u_* = \frac{ku(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.8)$$

Considerando uma altura de referência z_{ref} , para uma velocidade de referencia medida nesta altura, u_{ref} , tem-se

$$u_* = \frac{ku_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3.9)$$

Substituindo esta expressão na Eq. 3.8 tem-se, finalmente:

$$\frac{ku(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{ku_{\text{ref}}}{\ln\left(\frac{z_{\text{ref}}}{z_0}\right)} \quad (3.10)$$

$$u(z)_{\text{in}} = u_{\text{ref}} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{\text{ref}}}{z_0}\right)} \quad [m/s] \quad (3.11)$$

onde $u(z)_{\text{in}}$ é a velocidade dada pelo perfil logarítmico modificado, u_{ref} é a velocidade de referência obtida a uma altura de 10m do solo simulada pelo MM5. z_{ref} é a altura de referência (10 m) e z_0 é o comprimento aerodinâmico da rugosidade apresentados na Tabela 1.

Tabela 2 - Valores gerais de rugosidade.

Fonte : Valle et al. (2005)

Z ₀ (m)	Parâmetros
1	Cidade
0,3	Floresta
0,03	Gramma
0,0001	Água

Resumindo as condições de contorno da CLA impostas no CFX para uma CLA neutra adotada como isotérmica e em regime permanente, são:

Tabela 3 - Condições de contorno utilizadas no CFX 11.0

Contorno	Configurações
Entrada	<p>Velocidade, u: $u(z)_{in} = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$ [m/s]</p> <p>Energia cinética intensiva turbulenta $k = \frac{u^2}{\sqrt{c_\mu}}$</p> <p>Dissipação das energias cinéticas turbulentas $\varepsilon = \frac{u^3}{kz}$</p>
Saída	<p>Condições de derivada nula para todas as grandezas $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$ onde θ representa todas as variáveis a serem calculadas</p>
Solo	<p>Condições de não deslizamento para as velocidades ($u = 0, v = 0, w = 0$) Valores constantes para k e ε</p>
Céu	<p>$u = U_\infty$ e simetria para todas as outras variáveis $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$</p>

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelo de Mesoescala

Foram utilizados os dados de vento das predições do modelo MM5 nas suas componentes zonal e meridional a 10m do solo. Análises preliminares foram feitas através do software GrADS (Grid Analysis and Display System), de domínio público. Inicialmente, desenvolveram-se rotinas para extrair dos dados obtidos a magnitude do vento em seguida foi feito o calculo de sua energia cinética intensiva (potencial eólico).

É possível uma análise detalhada do potencial eólico da região do nordeste brasileiro, bem como dos possíveis efeitos das condições climáticas anômalas (aquecimento global) no ganho/perda da matriz energética brasileira no que tange a energia eólica. Na região em estudo foram feitas análises sazonais correspondentes a cada estação do ano.

4.1.1 Análise dos períodos do Modelo MM5

Para verificar as variações no campo de vento a 10 metros para o cenário futuro, apresentadas pelo modelo MM5 na região de estudo, foram analisados dois períodos distintos com base na climatologia de vinte anos. A primeira série correspondente ao intervalo de 1980 a 2000, o qual será denominado “período atual”, ao longo deste capítulo. Esse período considera os níveis atuais de CO₂ na atmosfera. As predições futuras do modelo levam em conta o aumento nos níveis de CO₂, para o cenário A2. Essas predições compreendem os intervalos de 2080 a 2100 e será denominada “futuro”.

Na Figura 4.1 (a) e (b), observa-se a velocidade média do vento para o período atual e o período futuro, respectivamente. O período atual apresenta velocidades variando predominantemente entre 2 m/s a 5 m/s sobre o continente e valores acima de 6 m/s sobre na região costeira.

A região central do estado do Ceará apresenta uma célula entre as latitudes latitude 4°S e 6°S com destaque para maiores variações no campo de vento, com um aumento da magnitude do vento nesta área

Na Figura 4.2 tem-se a diferença da velocidade média do vento em 10 metros entre o período futuro em relação ao período atual. Os valores negativos no campo de vento indicam que a velocidade média diminuiu em relação ao período atual, enquanto os valores positivos significam um aumento na velocidade do vento. Note que este aumento é predominante na região nordeste do Brasil.

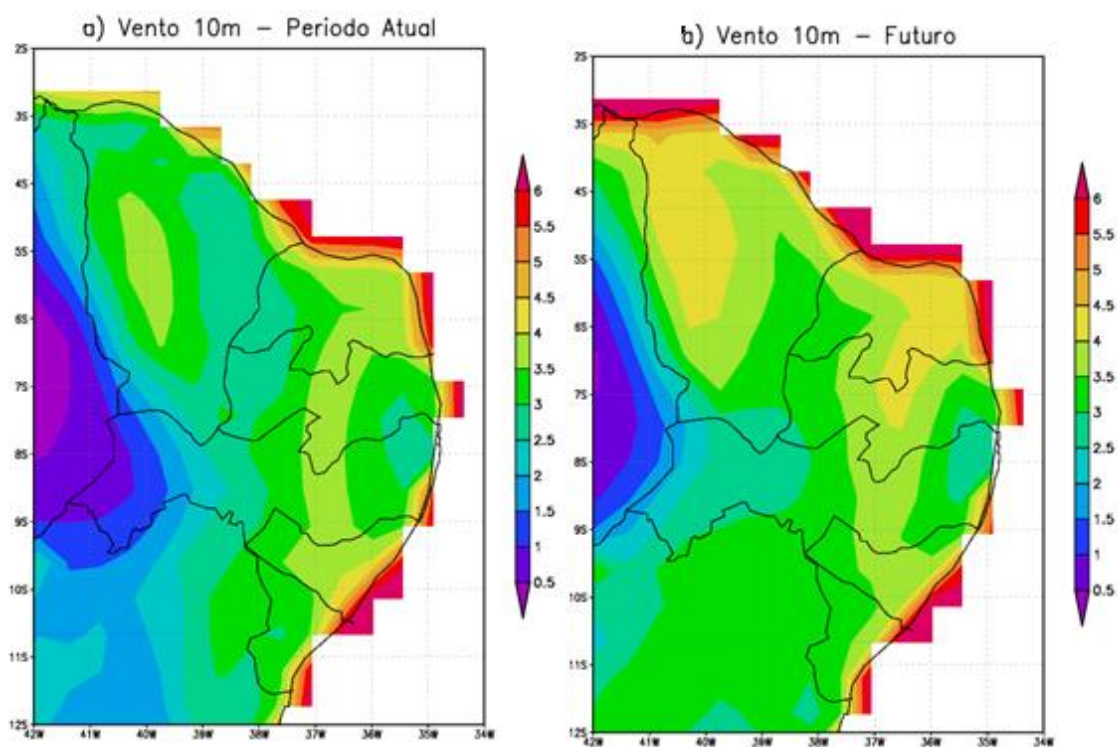


Figura 4.1 - Velocidade média do vento a 10 metros para (a) futuro (2080-2100) e (b) período atual (1980-2000)

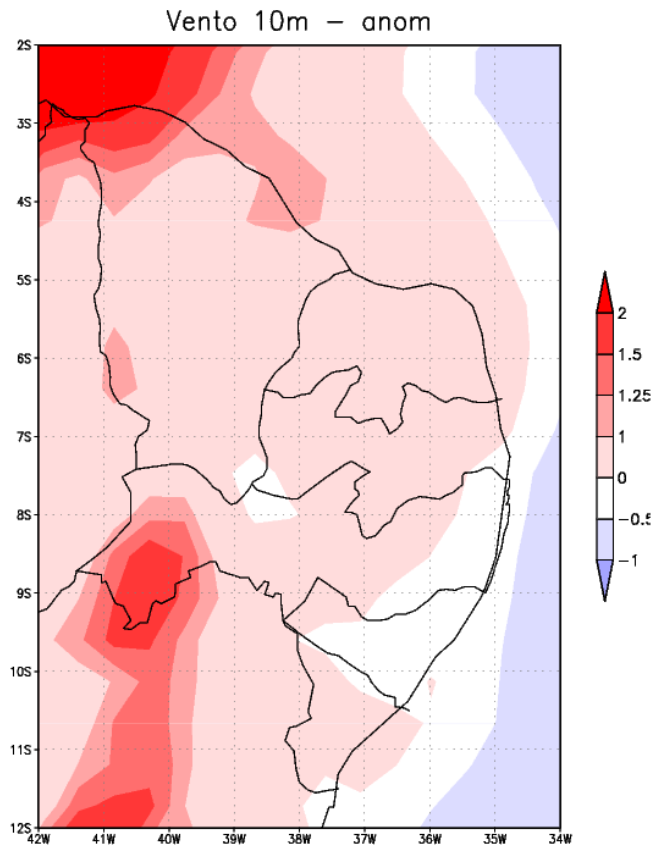


Figura 4.2 - Velocidade média anômala do vento (m/s) a 10m da superfícies entre a simulação do clima futuro e atual

Destacam-se o interior do Ceará e a região do sertão nordestino com os mais elevados índices de energia cinética intensiva dos ventos. Essas características podem ser vistas na figura 4.3 (c) e reforçadas por 4.3 (d). Essa variação sazonal dos ventos é explicada pela intensificação dos alísios de sudeste influenciados pela intensificação da alta subtropical nesta época do ano. É possível verificar que o outono é a época do ano com menores magnitudes dos ventos, o contrario se observa para o inverno e a primavera (Fig. 4.3 c, d), sendo estas as estações do ano com o maior potencial eólico.

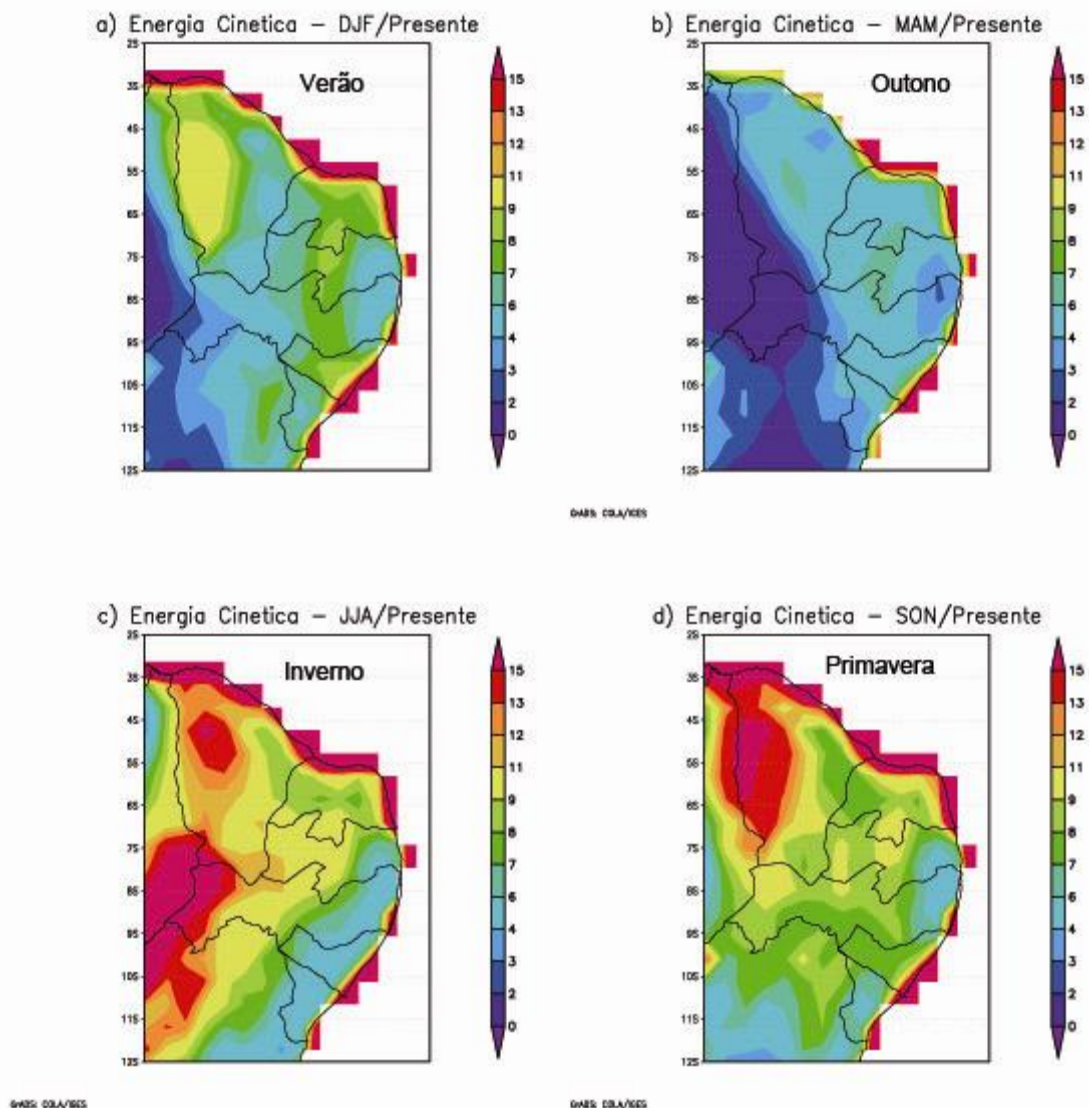


Figura 4.3 - Energia cinética intensiva do vento (J/kg) .Período atual Análise sazonal (a) Dezembro, Janeiro e Fevereiro (b) Março Abril e Maio (c) Junho Julho e Agosto (d) Setembro, Outubro e Novembro

A Figura 4.4 ilustra o cenário futuro da energia cinética intensiva dos ventos. Pode-se observar uma tendência no aumento do potencial eólico na maior parte do ano, com destaque para o período de inverno (Figura 4.4 (c))

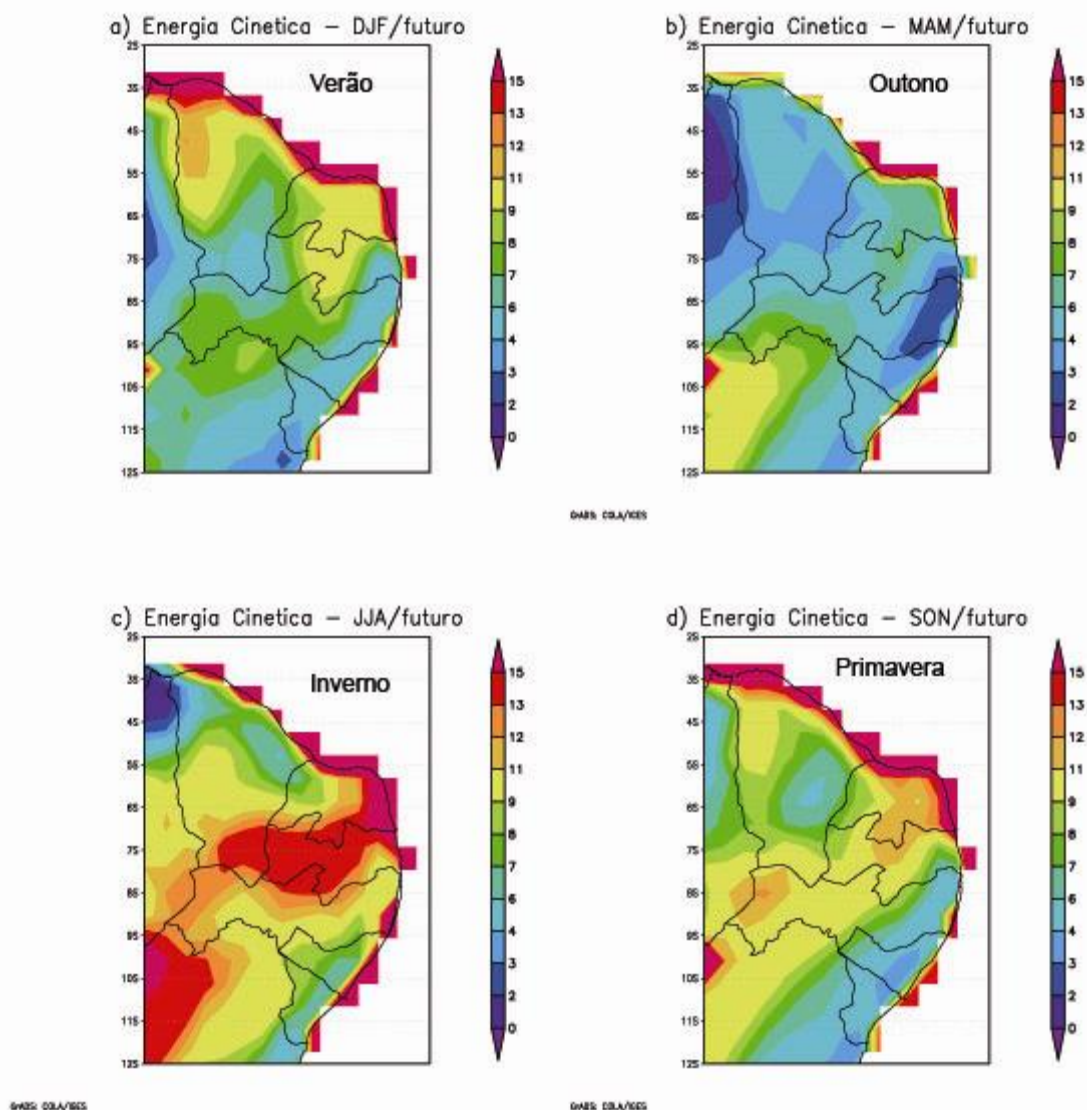


Figura 4.4 - Energia cinética intensiva do vento (J/Kg) para predição do modelo no futuro. Período sazonal (a) Dezembro, Janeiro e Fevereiro (b) Março Abril e Maio (c) Junho Julho e Agosto (d) Setembro, Outubro e Novembro

A Figura 4.5 ilustra a diferença do potencial eólico entre as projeções do futuro (2080-2100) e a simulação do presente (1980-2000) para as quatro estações do ano. Os valores negativos indicam que a energia cinética intensiva do vento a 10m diminuiu em relação ao período atual. A distribuição espacial das anomalias sugere que a região nordeste do Brasil, para a simulação do clima futuro, apresenta ligeira intensificação na magnitude dos ventos, com exceção para algumas regiões na estação de inverno e primavera (Figs 4.5 c, d), para qual se observa anomalias negativas influenciadas pela

mudança na forçante radiativa devido a inclusão dos gases de efeito estufa. No cenário de aquecimento global é interessante notar que as anomalias no verão e no outono (Fig. 4.5a, b), são menores que as projetadas para a segunda metade do ano na maior parte da do NEB. Isso mostra a viabilidade de aplicação de plantas eólicas nesta região do Brasil tanto para o período atual como para um cenário futuro de aquecimento global.

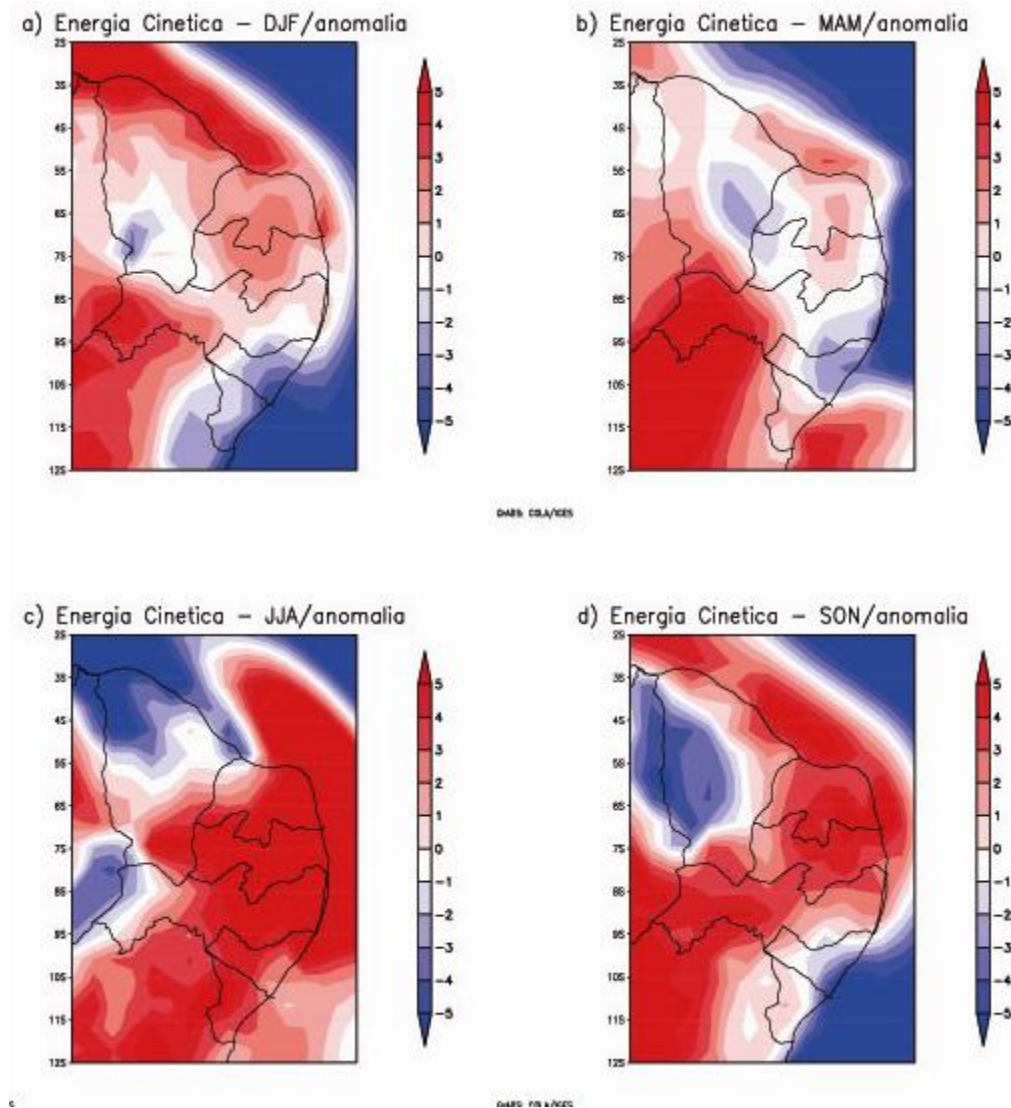


Figura 4.5 - Energia cinética intensiva do vento (J/kg) Análise sazonal (a) Dezembro, Janeiro e Fevereiro (b) Março Abril e Maio (c) Junho Julho e Agosto (d) Setembro, Outubro e Novembro

4.2. Modelo de microescala

A modelagem e a simulação do escoamento foram efetuadas por meio do emprego do software comercial CFX-11.

O domínio simulado (figura 3.3) tem aproximadamente 110900 x 110800 x 6000 metros, a região foi discretizada utilizando-se uma malha híbrida, com uma região próxima ao solo mais refinada com volumes quadráticos e o restante da malha composta de elementos tetraédricos. Com as condições de contorno descritas na parte 3.6 e na tabela 2, e com base nas previsões de vento do MM5, a uma altura de referência 10m, foi possível simular a energia cinética intensiva dos ventos a diferentes alturas (10m 50m 80m 100m) bem como obter gráficos do comportamento vertical da velocidade do vento

A figura 4.6 mostra a altitude na região de estudo do modelo de microescala, detalhando em vermelho as regiões de serra e em azul os vales.

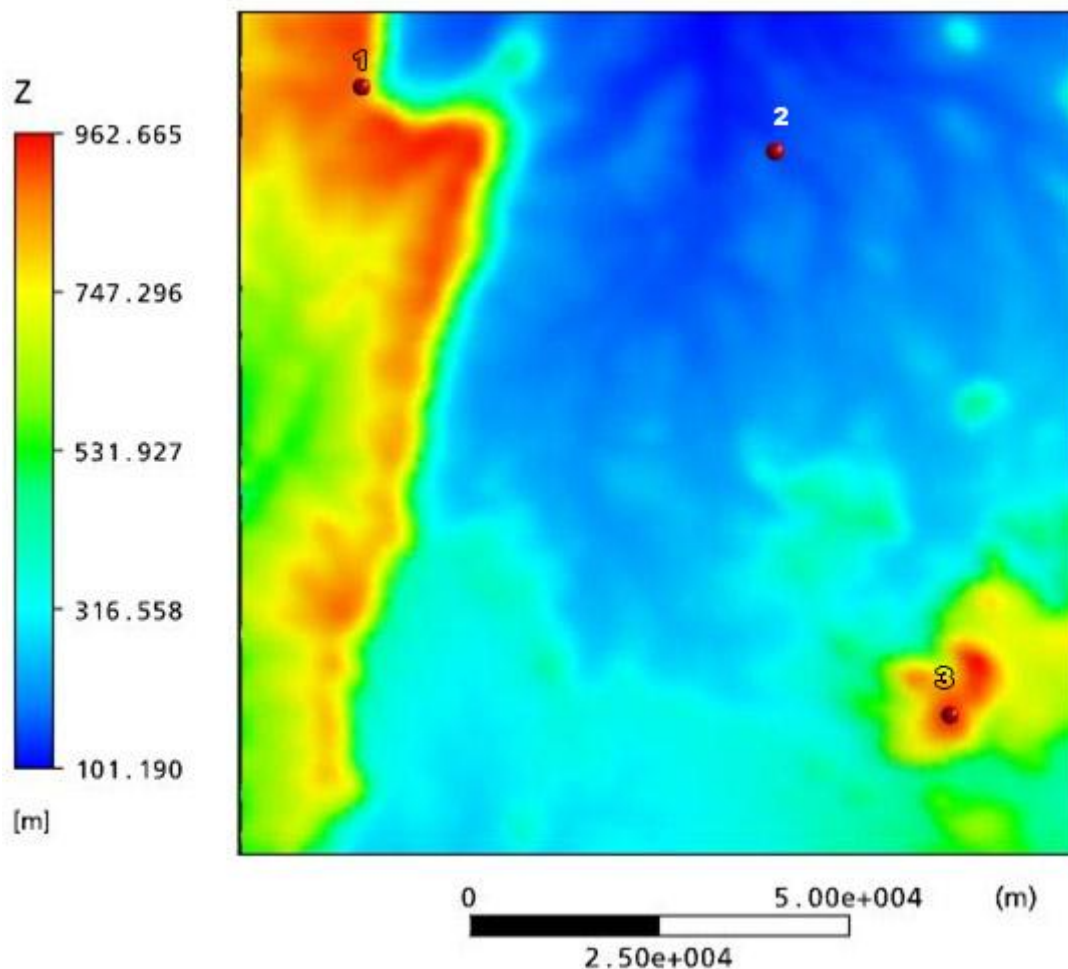
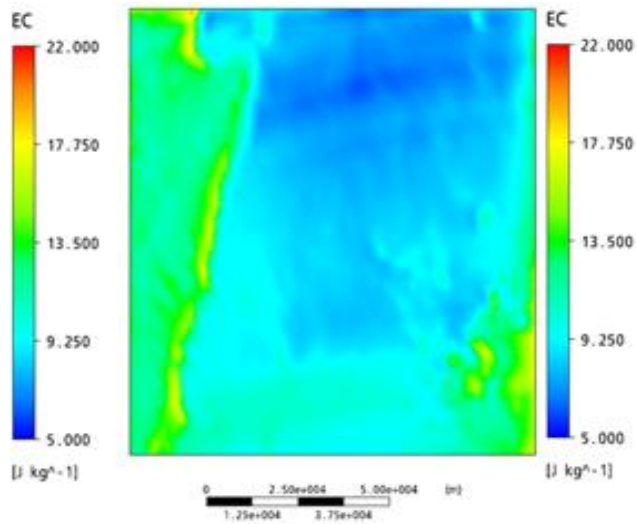


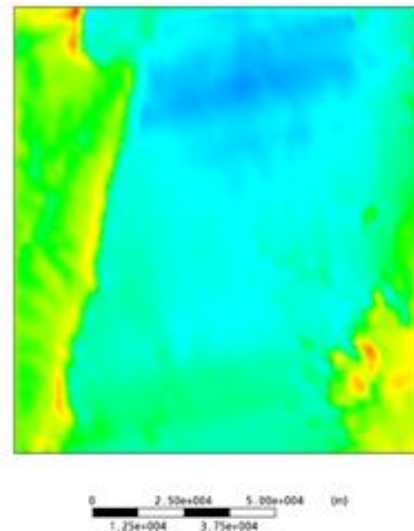
Figura 4.6 - Altitude em metros para a região de estudo

A Figura 4.7 mostra a variação da média anual da energia cinética intensiva do vento em função da altura em relação à superfície. As simulações do perfil de vento com base no modelo de micro-escala mostra maiores incrementos de energia cinética intensiva dos ventos na região de maior influência da Camada Limite Superficial (Figs 4.7a, b). Os prognósticos do modelo indicam um crescimento do potencial eólico nas regiões mais elevadas, com destaque para a pouca variação entre as previsões de 80m e 100m (Figs 4.7c, d), onde o modelo aponta um acréscimo desse potencial para alturas mais elevadas.

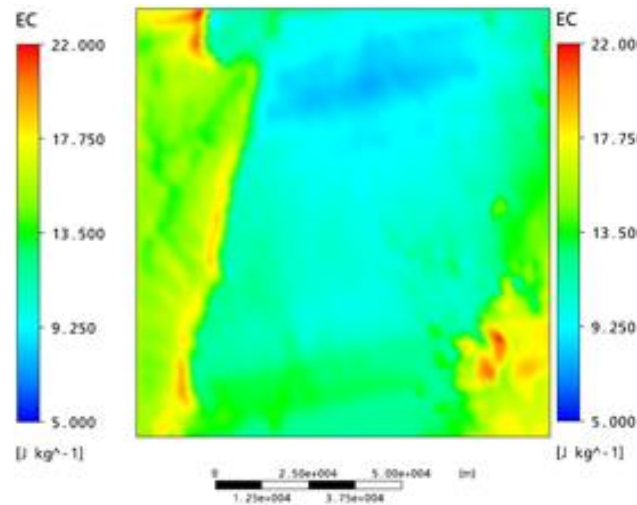
a) Energia cinética intensiva/10m



b) Energia cinética intensiva/50m



c) Energia cinética intensiva/80m



d) Energia cinética intensiva/100m

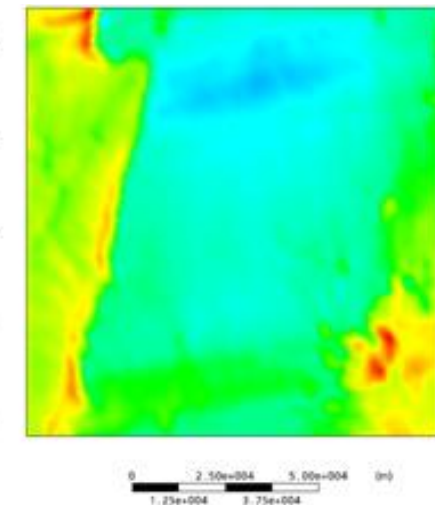
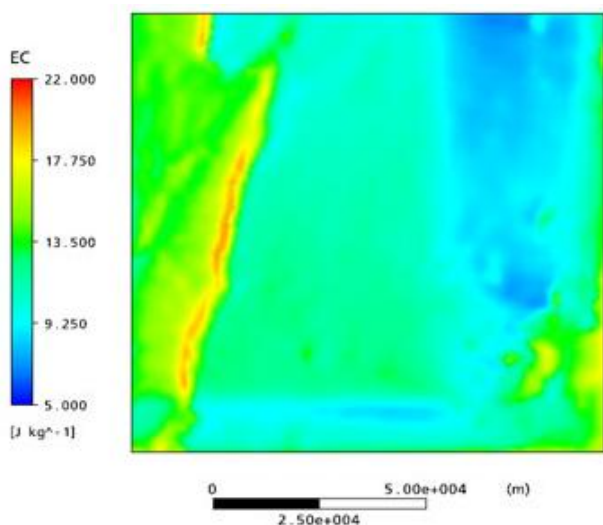


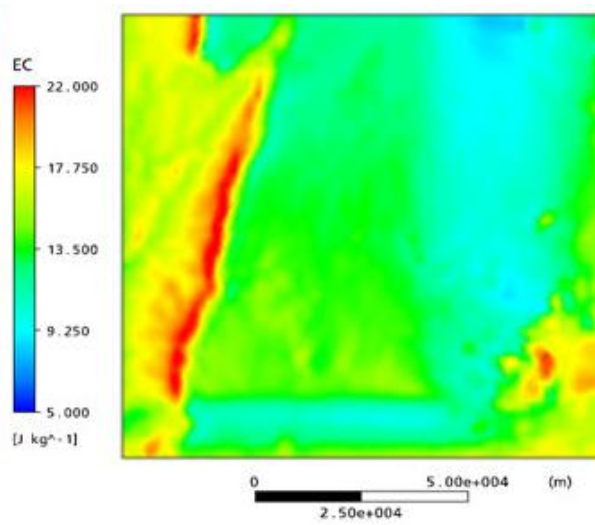
Figura 4.7 - Energia cinética intensiva do vento (J/kg) para o período atual Análise vertical (a) 10 metros do solo (b) 50m do solo (c) 80m do solo (d) 100m do solo. Alturas em relação a superfície do solo

Na figura 4.8 observou-se novamente a variação vertical da energia cinética intensiva dos ventos, agora para o período futuro. Sendo possível comparar os campos de vento para o período atual, figura 4.7 e o período futuro (2080-2100), com valores variando de 5 J/Kg a 22 J/Kg, ultrapassando este valor máximo para regiões de maiores altitudes. Nestas áreas o modelo mostra um aumento do potencial eólico, em destaque para as áreas montanhosas, figura 4.8 (b), (c) e (d) em relação ao período atual, figura 4.7

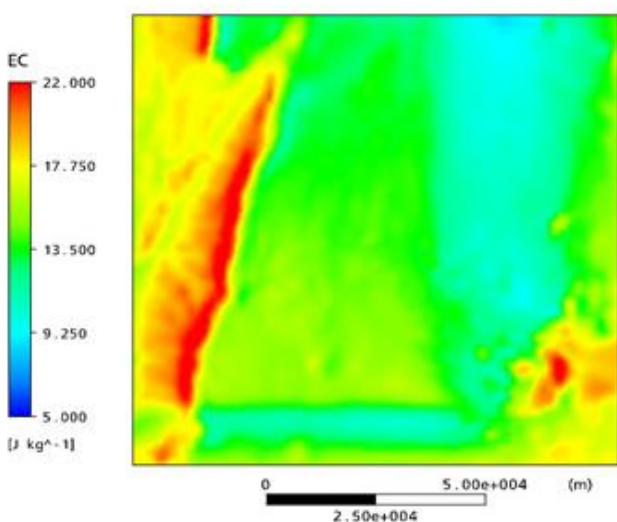
a) Energia cinética intensiva/10m



b) Energia cinética intensiva/50m



c) Energia cinética intensiva/80m



d) Energia cinética intensiva/100m

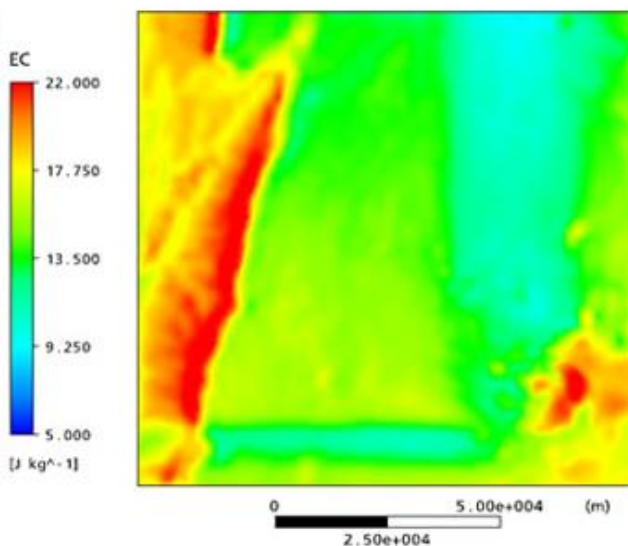
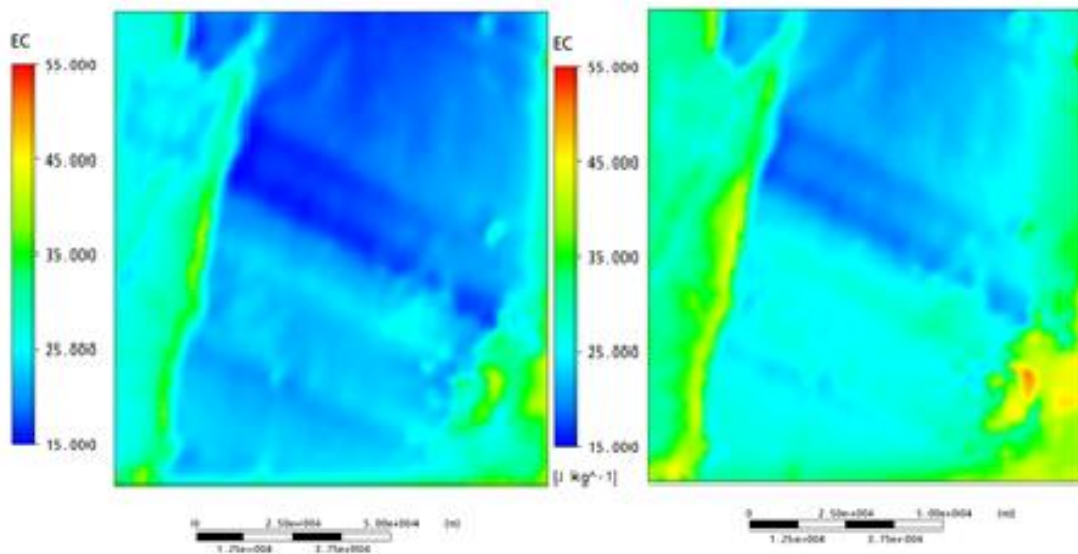


Figura 4.8 - Energia cinética intensiva do vento (J/kg) para o período futuro Análise vertical (a) 10 metros do solo (b) 50m do solo (c) 80m do solo (d) 100m do solo. Alturas em relação a superfície do solo

A figura 4.9 mostra o período de Junho a Agosto (JJA) do presente, época muito significativa para o potencial eólico. Esse é período do ano de maiores velocidades do vento, com valores da energia cinética intensiva variando entre 15 J/Kg a 55 J/Kg. Baseado na figura, torna-se evidente a intensificação da magnitude do vento nas regiões mais altas (Figura 4.9 (c) e (d))

a) Energia cinética intensiva/10m

b) Energia cinética intensiva/50m



c) Energia cinética intensiva/80m

d) Energia cinética intensiva/100m

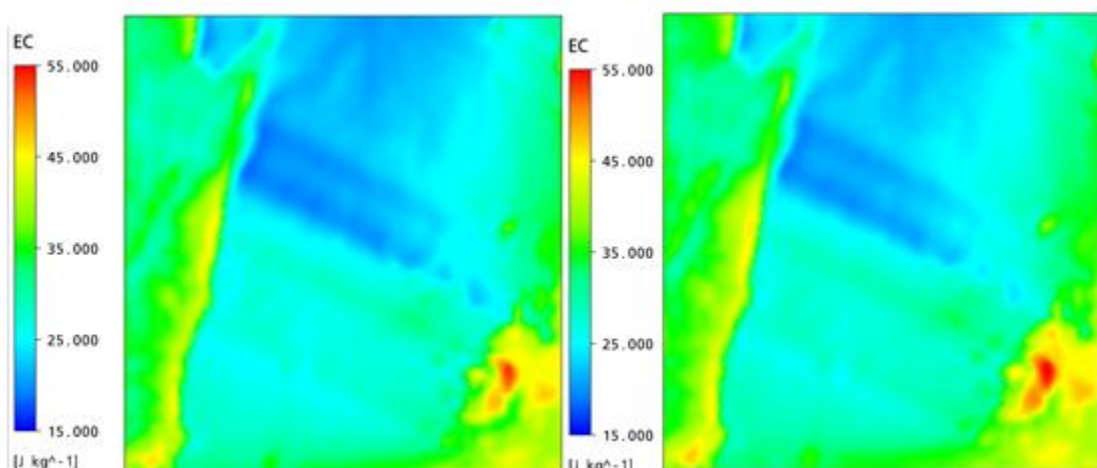


Figura 4.9 - Energia cinética intensiva do vento (J/kg) para o período inverno/presente. Análise vertical (a) 10 metros do solo (b) 50m do solo (c) 80m do solo (d) 100m do solo. Alturas em relação a superfície do solo

A figura 4.6 mostra os pontos onde os perfis verticais de velocidade nos pontos 1, 2 e 3 serão computados. O ponto 2 está localizado antes da colina, numa região bem mais baixa e plana. Os pontos 1 e 3 estão localizados em regiões de picos mas com altitudes diferentes, sendo o ponto 3 o de maior altitude. Nota-se que para o ponto na região plana e de menor altitude (ponto 2), o perfil é parabólico (fig. 4.10), apresentado pouca aceleração perto da superfície. Para os pontos 1 e 3, localizados em nos picos dos aclives, nota-se um aumento de velocidade na região próxima do solo, caracterizando a aceleração do escoamento devido a compressão das camadas superiores com o pico da colina (fig. 4.11).

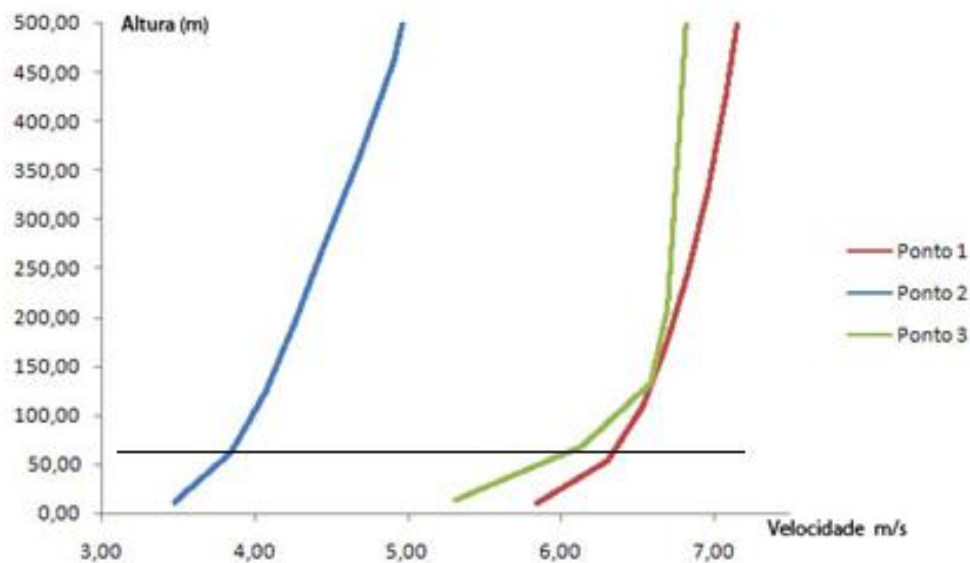


Figura 4.10 - Perfis Verticais de Velocidade nos Pontos de referencia 1, 2 e 3 da figura 4.6. Média anual período atual

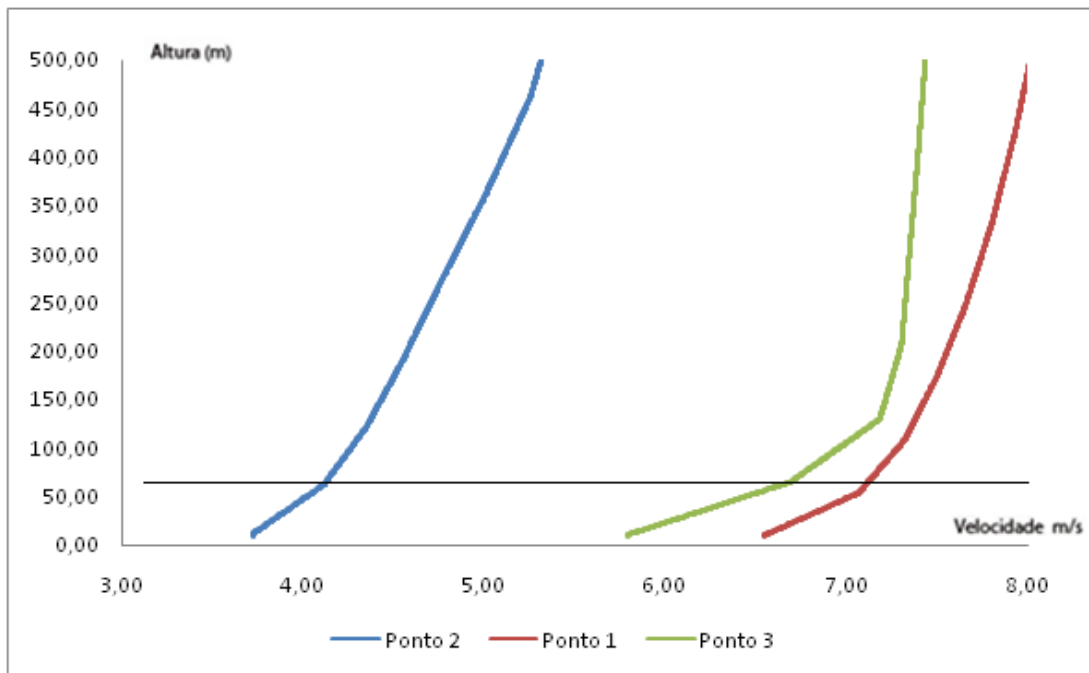


Figura 4.11 - - Perfis Verticais de Velocidade nos Pontos de referencia 1, 2 e 3 da figura 4.9. Média anual período futuro

A partir da análise do gráfico das figuras 4.11 e 4.12, verifica-se um aumento da velocidade do vento com a altura com valores de máximo local aproximadamente em 80m do solo (linha cinza nas figuras 4.11 e 4.12). Este é, portanto, um bom indicativo para a altura da torre eólica ideais para a região de estudo. É valido considerar que o gargalo em projetos eólicos é a estrutura física (altura das torres e turbinas), devido ao alto custo destas estruturas em projetos eólicos, o que torna de suma importância conhecer o perfil vertical do vento na região.de instalação de torres.

5 CONCLUSÕES

A análise dos principais mecanismos de vento atuantes no Nordeste permite um melhor entendimento dos recursos eólicos da região. O conhecimento do comportamento e das características destes ventos fomenta a compreensão e o controle dos principais aspectos científicos necessários para um adequado mapeamento eólico regional.

Os resultados apresentados baseado em simulações numéricas, avaliou o potencial eólico sob duas condições climáticas denominadas cenário atual e aquecimento global. Com isto foi possível dispor de uma análise sazonal e detalhada do potencial eólico de parte do nordeste brasileiro, bem como das possíveis anomalias em um cenário de aquecimento global. Os resultados das projeções dos modelos mostram a viabilidade da aplicação de plantas eólicas nesta região do Brasil tanto para o período atual como para um cenário futuro.

Predições dos modelos indicam o período de Junho a Agosto (Inverno), época muito significativa para o potencial eólico, com valores da energia cinética intensiva variando entre 15 J/Kg a 55 J/Kg. A análise vertical da Camada Limite atmosférica, é de suma importância para definir o posicionamento de turbinas eólicas bem como a altura das torres. Baseado em perfis de vento a partir de simulações de pequena escala os resultados indicam alturas ótimas entre 80 e 100 metros do solo

Deve-se notar ainda que as estimativas para o cenário futuro são de relevância ímpar no que se refere a mitigação dos efeitos dos gases de efeito estufa, bem como são úteis para um planejamento futuro da matriz energética brasileira.

A necessidade do uso de modelos com diferentes complexidades, bem como a aplicação de diferentes metodologias para o cálculo do potencial eólico, é de suma importância para aumentar a confiabilidade das estimativas, e assim dispor de uma malha representativa da capacidade de geração deste tipo de energia no nordeste do Brasil.

O dimensionamento eólico de meso para microescala é válido no que tange a detecção precisa de pontos ótimos para a altura da torre. Como também para visualizar de forma mais detalhada a distribuição da energia cinética intensiva dos ventos. Já que o

uso de modelos de microescala esta relacionado à capacidade que estes possuem de lidar com altos valores do numero de Reynolds (turbulência) presentes na camada limite atmosférica (CLA), e simular melhor os obstáculos da superfície.

6 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2008: ano base 2007**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2008. 52 p. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/Sum_Executivo_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2010

AMARANTE, O. A. C.; DA SILVA, F. J. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Camargo Schubert Engenharia Eólica, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/CEPEL. Brasília, 2001.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 1988, 303 p. ISBN 9780120644902.

BANDEIRA, M.M. **Regionalização do regime eólico no Nordeste do Brasil**. Departamento de Ciências Atmosféricas, DCA/UFPB. 62p, 1990.

CARDOSO, G. M. **Estimativas da Evapotranspiração de Referência a partir de um Modelo Regional de Clima-Vegetação Sob Condições Atuais e de Aquecimento Global**. Dissertação (mestrado em meteorologia agrícola) Universidade Federal de Viçosa, 2009.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. **Energia Eólica – Princípios e Aplicações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/> Acesso em: 21 mar. 2010

CFX . "**CFX-10 Solver and Solver Manager Guide**", AEA Technology Engineering Software Ltd, UK. 2004

Chen, F. and J. Dudhia,: **Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity.** 2001

DOS SANTOS, A.J.B. **Micrometeorologia de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas.**2001. 91p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

DUDHIA, J.; GILL, D.; GUO, Y.; MANNING, K.; WANG, W.; CHISZAR, J. **Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3,** PSU/NCAR, 2004

DUDHIA, G. A. G. J. and D. R. Stauffer, 1999: **A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5).** Note tn-398+str, NCAR.

EMANUEL, K. A., 2005: **Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years.** *Nature*, 436, 686–688.

GRELL, G. A.; J. DUDHIA; STAUFFER, D. R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). **NCAR Technical Note**, NCAR/TN-398+STR, 117 pp., 1994.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** São Paulo: EDUSP, 2003. 225p. ISBN 8531404525.

GRELL, G. A., DUDHIA, J., STAUFFER, D. R., 1995, “**A description of the fifthgenerationPenn State/ NCAR mesoscale model (MM5).**” NCAR Technical Note,

HONG, S.-Y. and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a mediumrange forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.

ICHIBA, S.H. **Estudo das temperaturas do ar no Estado do Paraná**. 2006, 124 p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

GOLDEMBERG E L.D. VILLANUEVA, **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento** (Edusp, São Paulo, 2003), 2a. Ed

KAIN, J. S. and J. M. Fritsch, 1993: **Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models**. Amer. Met. Soc.

LYRA, R. F. F. **Predominância do vento na região de tabuleiros costeiros próximo a Maceió**. X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, 1998.

MARQUES, Jeferson. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 132p. 2004.

MARTINS, F., E. Pereira, C. Yamashita, S. Pereira, and S. N. and, 2005: **Base de dados climaticambientais aplicados ao setor energetico** - Projeto SONDA.

MARTINS F.R, R.A. Guarnieri e E.B. Pereira **O aproveitamento da energia eólica** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, 1304 2008

MOREIRA, G. A. A.; MARTINS, M. A.; VALLE, R. M. . **ESTUDO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA SOBRE TERRENOS COMPLEXOS**. 2006 In VIII Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecânica

MOREIRA, G. A. A **MODELAGEM NUMÉRICA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia da UFMG 2007

MUNHOZ, F. C.; GARCIA, A. **Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava SP**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, p. 30-34, 2008.

NaturalResources Canada Disponível em:

http://www.retscreen.net/download.php/pt/798/1/Course_wind_pt.ppt Acesso em: 23 de março 2010

ROCHA, C. H. E; LYRA, R. F. F. **Ocorrência de brisas na região de tabuleiros costeiros próximo a Maceió –Al.** XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

PES, M. P. **Estudo do impacto das mudanças climáticas no potencial eólico no estado do rio grande do sul.** 2009.Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. SP

SILVA, G. R. **Características de vento da região nordeste Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais Eólicas.** Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco 2003

SILVA, A.R. **Estudo observacional do regime de vento no Estado de Alagoas, nos períodos seco e de transição seco-chuvoso.** 2009, 100p. Trabalho de Conclusão (Bacharelado em Meteorologia), Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

STULL, R. B. (1998). **"An Introduction to Boundary Layer Meteorology"**. Atmospheric Sciences Library, D. Reidel Pub Co.

SUTTON, O.G. **Micrometeorology – A study of physical processes in the lowest layers of the Earth's atmosphere**, v..2, 333 p, 1977.

RHIE, C. and W. Chow, 1983: **Numerical study of turbulence flow past an airfoil with trailing edge separation.** AIAA Journal , 21, 1527–1532.

ULDEN, A. V. and A. Holtslag, 1985: **Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications.** Journal of Climate and Applied Metereology, 24, 1196–1207.

VALLE, R. M. ; Nascimento, C. A. M. ; Martins, M. A. ; Abreu, J. A. ; Moreira, G. A. A. (2005). "**Numerical Model Validation of a Atmospheric Boundary Layer Over Complex Terrain.**" In: 18th International Congress of Mechanical

VIDAL, José. Entrevista - Conselho em Revista. CREA-RS. Porto Alegre: n. 22, p.6-7, 2006.

WMO. **Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source.** Geneva Switzerland, 1981. 175 p.