



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – ICAT



COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Nº de ordem: MET – UFAL – MS – 047

**CARACTERIZAÇÃO DO VENTO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO
PARA A REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS (PILAR, ALAGOAS)**

JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA

MACEIÓ – ALAGOAS

Junho, 2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – ICAT



COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Nº de ordem: MET – UFAL – MS/047

**CARACTERIZAÇÃO DO VENTO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO
PARA A REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS (PILAR, ALAGOAS)**

JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Atmosféricas/UFAL, para obtenção do título de Mestre em Meteorologia – Área de Concentração em Processos de Superfície Terrestre.

Orientador: Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra

MACEIÓ – ALAGOAS

Junho, 2007

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

- S586c Silva, Juliane Kayse Albuquerque da.
Caracterização do vento e estimativa do potencial eólico para a região de tabuleiros costeiros (Pilar, Alagoas) / Juliane Kayse Albuquerque da Silva.
– Maceió, 2007.
xii, 64 f. : grafs., tabs.
- Orientador: Roberto Fernando da Fonseca Lyra.
Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) –
Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió,
2007.
- Bibliografia: f. 59-64.
1. Ventos – Velocidade. 2. Turbulência atmosférica. 3. Ventos – Direção.
4. Energia eólica. I. Título.

CDU: 551.556.3(813.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

**“CARACTERIZAÇÃO DO VENTO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL
EÓLICO PARA A REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS (PILAR,
ALAGOAS)”**

JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia. N.º de ordem: MET-UFAL-MS-047.

Aprovada pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra
(Orientador)

Prof. Dr. Cláudio Castro Pellegrini
(Membro Externo - UFSJ)

Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim
(Membro)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
PENSAMENTOS	iii
LISTAS DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE EQUAÇÕES	vii
RELAÇÃO DE ABREVIATURAS	viii
RELAÇÃO DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
	Página
1 – INTRODUÇÃO	01
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 – Definição do vento	03
2.1.1 – Mecanismos de geração do vento	05
2.2 – Caracterização do vento	06
2.2.1 – Direção e Velocidade do vento	06
2.3 – Rajadas e Turbulências	08
2.4 – Energia Eólica	08
2.4.1 – Componentes de um sistema eólico	10
2.4.2 – Energia Eólica no Brasil	11
2.4.3 – Custo Benefícios	13
2.4.4 – Impactos e Problemas	15
2.4.5 – Projetos de Energia Eólica	16

3 – MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 – Área de Estudo	19
3.2 – Medidas Realizadas	21
3.3 – Tratamento dos dados	23
3.3.1 – Cálculo da Velocidade Média	23
3.3.2 – Fator de Rajadas	24
3.3.3 – Índice de Turbulência	24
3.3.4 – Estimativa do vento e Potencial Eólico	25
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 – Variação Interanual	26
4.1.1 – Velocidade do vento	26
4.1.2 – Direção do vento	29
4.1.3 – Turbulência Atmosférica	32
4.1.3.1 – Índice de Turbulência	32
4.1.3.2 – Fator de Rajadas	34
4.2 – Ciclos Diários Médios Mensais: Comparação entre Inverno e Verão	37
4.2.1 – Velocidade do vento	37
4.2.2 – Direção do vento	40
4.2.3 – Turbulência Atmosférica	42
4.2.3.1 – Índice de Turbulência	42
4.2.3.2 – Fator de Rajadas	44
4.3 – Relação entre a Velocidade do vento e a Turbulência Atmosférica	46
4.4 – Análise Estatística do vento	48
4.4.1 – Velocidade do vento	48
4.4.2 – Direção do vento	49
4.5 – Estimativa do Potencial Eólico	51
4.5.1 – Estimativa Horária do Potencial Eólico: Comparação entre Inverno e Verão	52

4.5.2 – Análise Estatística da Velocidade do Vento e do Potencial Eólico estimado a setenta e cinco metros	55
5 – CONCLUSÕES	57
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

A minha irmã Fernanda, ao
meu cachorro (Kevin) e a
todos os meus familiares
OFEREÇO.

Aos meus pais Jilse & Cid
pelo carinho e conselhos
em minha vida e a Carlos
Alexandre por todo carinho
e paciência DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a DEUS por iluminar meus caminhos dando-me forças para superar os obstáculos em minha vida e tornar realidade meus sonhos.

A Carlos Alexandre pelo carinho, paciência, dedicação e por está ao meu lado sempre (mesmo à distância), me incentivando nos momentos mais difíceis. Obrigado por acreditar em mim: EU TE AMO.

Ao Professor Dr. Roberto Lyra, por “me adotar” no decorrer do curso e pelo o apoio e a paciência na realização deste trabalho.

A Mestre Djane que mesmo a distância foi uma amiga muito querida e esteve ao meu lado (on line) durante essa minha conquista.

Ao Sr. Sebastião Batalha por ceder sua propriedade para instalação do projeto MICROMA.

Ao CNPq pelo suporte financeiro do projeto MICROMA.

Aos colegas da sala de micrometeorologia pela companhia e os risos nos momentos de descontração.

Aos meus familiares e amigos muito queridos (eles sabem quem são e por isso não preciso citar nomes) que de maneira direta e indireta me apoiaram e me incentivaram na busca desse título.

A banca examinadora, Prof. Dr. Cláudio Pellegrini e Prof. Dr. Ricardo Amorim que acreditaram nesse trabalho e o enriqueceram com seus conselhos e experiências.

PENSAMENTOS

FÁCIL E DIFÍCIL

Falar é completamente fácil, quando se tem palavras em mente que se expresse sua opinião. Difícil é expressar por gestos e atitudes, o que realmente queremos dizer.

Fácil é julgar pessoas que estão sendo expostas pelas circunstâncias. Difícil é encontrar e refletir sobre os seus próprios erros.

Fácil é fazer companhia a alguém, dizer o que ela deseja ouvir. Difícil é ser amigo para todas as horas e dizer a verdade quando for preciso.

Fácil é analisar a situação alheia e poder aconselhar sobre a mesma. Difícil é vivenciar esta situação e saber o que fazer.

Fácil é demonstrar raiva e impaciência quando algo o deixa irritado. Difícil é expressar o seu amor a alguém que realmente te conhece.

Fácil é viver sem ter que se preocupar com o amanhã. Difícil é questionar e tentar melhorar suas atitudes impulsivas e às vezes impetuosas, a cada dia que passa.

Fácil é mentir aos quatro ventos o que tentamos camuflar. Difícil é mentir para o nosso coração.

Fácil é ver o que queremos enxergar. Difícil é saber que nos iludimos com o que achávamos ter visto.

Fácil é ditar regras e, Difícil é segui-las...

(*) Título original: Reverência ao destino (Carlos Drummond de Andrade)

“Uma das coisas que aprendi é que se deve viver apesar de...” (Clarice Lispector).

LISTA DE FIGURAS

Figuras		Pág.
01	Variação do vento com altura (Fonte: FERREIRA & LEITE, 2006).	07
02	Projetos de energia eólica no Brasil (Fonte: CBEE, 2006).	17
03	Localização do projeto MICROMA na Fazenda Vila Nova, no município de Pilar (9°36'12"S; 35°53'46"W; 170m).	20
04	Evolução da Velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999.	27
05	Evolução da Direção média do vento (graus) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998.	31
06	Evolução da Intensidade de Turbulência para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999.	33
07	Evolução do Fator de rajadas para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999.	35
08	(A) Ciclo horário da Velocidade média do Vento ($m.s^{-1}$) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999; (B) Ciclo horário da Velocidade média do Vento ($m.s^{-1}$) entre inverno e verão.	38
09	(A) Ciclo horário da direção do Vento (graus) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998; (B) Ciclo horário da direção do Vento (graus) entre inverno e verão.	41
10	(A) Ciclo horário do Índice de Turbulência (It) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999; (B) Ciclo horário do Índice de Turbulência (It).	43
11	(A) Ciclo horário do Fator de Rajadas (G) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999; (B) Ciclo horário do Fator de Rajadas (G) entre inverno e verão.	45
12	Velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) versus Índice de Turbulência no período de Julho de 1996 à Setembro de 1999.	47
13	Velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) versus Fator de rajadas no período de Julho de 1996 à Setembro de 1999.	47
14	Distribuição da freqüência para intervalos da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) no período de julho de 1996 a setembro de 1999.	48

Figuras		Pág.
15	Distribuição da freqüência para intervalos da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) no período de julho de 1996 a setembro de 1999.	49
16	Distribuição da freqüência para intervalos da direção do vento ($m.s^{-1}$) no período de julho de 1996 a setembro de 1998.	50
17	Distribuição da freqüência para intervalos da direção do vento (graus) no período de julho de 1996 a setembro de 1998.	51
18	(A) Ciclo horário do potencial eólico ($w.m^{-2}$) para a região de Pilar – AL durante o período de julho de 1996 a setembro de 1999; (B) Ciclo horário do potencial eólico ($w.m^{-2}$) entre inverno e verão.	54
19	Distribuição da freqüência para intervalos da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) a 75m para o período de julho de 1996 a setembro de 1999.	55
20	(A) Distribuição de freqüência para intervalos do potencial eólico ($W.m^{-2}$) no período de julho de 1996 a setembro de 1999 entre 0 e 1000 $W.m^{-2}$; (B) Distribuição de freqüência para intervalos do potencial eólico ($W.m^{-2}$) no período de julho de 1996 a setembro de 1999 entre 0 e 100 $W.m^{-2}$.	56

LISTA DE TABELAS

Tabelas		Pág.
01	Frequência do registro e altura do sensor de velocidade (ff1 a ff4) e direção (dd1 a dd4).	22
02	Média mensal da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) durante os anos de 1996/1997/1998/1999, para a região do Pilar - AL.	28
03	Média mensal do Potencial eólico ($W.m^{-2}$) durante os anos de 1996/1997/1998/1999, para a região do Pilar - AL.	52

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página	
Equação 01	Componente zonal do vento.	23
Equação 02	Componente meridional do vento.	23
Equação 03	Velocidade média diária.	24
Equação 04	Fator de Rajadas (G).	24
Equação 05	Índice de Turbulência	24
Equação 06	Correlação entre a velocidade média do vento medido e a altura estimada	25
Equação 07	Correlação entre a velocidade média do vento medido e a altura a setenta e cinco metros	25
Equação 08	Potencial Eólico	25

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CBTTE	Centro Brasileiro de Testes de Turbinas Eólicas
CEAL	Companhia Energética de Alagoas
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CNPq/PTU	Centro Nacional de Pesquisas – Programa do Trópico Úmido
COELBA	Companhia Energética do Estado da Bahia
COELCE	Companhia Energética do Ceará
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EMA	Estação Meteorológica Automática
EWEA	Centro de Ciências Agrárias
G	Fator de Rajadas
IMA	Instituto do Meio Ambiente
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
L	Leste
It	Índice de Turbulência
Kt	Knot

MICROMA	Micrometeorologia da Mata Atlântica Alagoana
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MMA	Ministério de Meio Ambiente e Amazônia Legal
N	Norte
NEB	Nordeste Brasileiro
NO	Noroeste
O	Oeste
S	Sul
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

RELAÇÃO DE SÍMBOLOS

°C	Celsius
dB	Decibéis
GWh	GigaWatts hora
km	quilômetro
Kwh	QuiloWatts hora
m.s ⁻¹	Metros por segundo
MWh	Mega Watts hora
$\frac{P}{A}$	Potencial Eólico
ρ	Densidade do ar
W.m ⁻²	Watts por metro quadrado

CARACTERIZAÇÃO DO VENTO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO PARA A REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS (PILAR, ALAGOAS)

DA SILVA, Juliane Kayse Albuquerque. Caracterização do vento e Estimativa do Potencial Eólico para a Região de Tabuleiros Costeiros (Pilar, AL). Orientador: Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra. Maceió-AL, 2007. 64p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a caracterização do comportamento do vento (velocidade, direção, índice de turbulência e fator de rajadas), bem como fazer uma estimativa preliminar do potencial eólico para a região de tabuleiros costeiros próximo a Maceió. Foram utilizados os dados de vento coletados durante a realização do projeto MICROMA (Micrometeorologia da Mata Atlântica Alagoana) montado na Fazenda Vilanova, Pilar – AL (9°36'12"S, 35°53'46"W, 170 m), no período de julho de 1996 a setembro de 1999. Os resultados mostraram que o vento no local é influenciado pelos fenômenos locais e os de grande escala. A velocidade (8,29 m) diminui no inverno e aumenta no verão, e, em ambas as estações, é bem maior durante o dia. Quase metade (46%) dos casos são ventos na faixa de zero até 2,0 m.s⁻¹. A direção apresenta pouca variabilidade e o fluxo predominante é no sentido oceano-continente (66%). A turbulência atmosférica é inversamente proporcional a velocidade do vento. O vento estimado para 75m em 99,5% dos casos foi superior a velocidade de partida dos aerogeradores (2,5 m.s⁻¹). O valor médio estimado para o potencial eólico foi de 110,27±106,51 W.m⁻² com maior ocorrência na faixa entre 50-100 W.m⁻² (38,6%).

Palavras-Chave: Velocidade do vento, Direção do vento, Turbulência atmosférica, Energia eólica.

WIND CHARACTERIZATION AND AEOLIAN POTENTIAL ESTIMATE TO THE COASTAL REGION (PILAR, ALAGOAS)

DA SILVA, Juliane Kayse Albuquerque. Wind Characterization and Aeolian Potential estimate to the coastal region (Pilar, AL). Adviser: Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra. Maceió-AL, 2007. 64p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)

ABSTRACT

The aim of this study was to characterize the wind behavior (velocity, direction, turbulence index and gust factor), as well as a preliminary estimate of the aeolian potential in coastal region close to Maceió. The wind data utilized was collected during the MICROMA project (Micrometeorologia da Mata Atlântica Alagoana) installed at Vilanova Farm, Pilar – Alagoas State (9°36'12"S, 35°53'46"W, 170 m), from July/1996 to September/1999. The results showed that the local wind is influenced by micro and macro scale phenomenon. The wind velocity (8,29m height) decreases in the winter and increases in the summer. In the two seasons the wind velocity is faster during daytime. Almost in a half of the case (46%) the wind velocity is between zero and 2,0 m.s⁻¹. The wind direction showed a little variability and the predominant flow is from ocean to continent felt (66%). The behavior of the atmospheric turbulence is inverse to the wind velocity. The wind velocity (estimated to 75m height) in 99,5% of the cases was superior to the initial velocity to start the aero generator (2,5 m.s⁻¹). The simulated average wind power potential value was 110,27±106,51 W.m⁻².

Key words: Wind velocity, Wind direction, Atmospheric turbulence, aeolian energy.

1.0 – INTRODUÇÃO

Há muito tempo o ser humano vem buscando na natureza recursos para sua sobrevivência, e acreditou-se que nela houvesse a existência de fontes inesgotáveis para seu sustento, como a utilização da energia produzida pelas águas e pelos ventos na construção de moinhos para moagem de grãos, bombeamento de águas para irrigação e operações de serraria. Mas o crescimento urbano e industrial necessitou de um aumento na utilização destes recursos naturais para a capacitação energética na sociedade.

A exploração dos recursos naturais para a manutenção deste desordenado desenvolvimento despertou um crescente interesse pela energia elétrica devido as freqüentes crises no setor energético, e por conseqüência um interesse pelo desenvolvimento das fontes alternativas de energia, ou seja, fontes renováveis da natureza como a energia de biomassa, e fontes inesgotáveis como a energia solar e energia eólica.

Atualmente existe uma crescente demanda na expansão da produção de energia através da fonte eólica, por encontrar nos ventos uma força inesgotável e abundante, disponível em diversos lugares.

É sabido que o vento é o resultado do deslocamento horizontal do ar produzido pelo gradiente de pressão de origem térmica em duas regiões distintas, e com isso varia de acordo com o local (topografia e rugosidade da superfície) e a época do ano. É uma variável meteorológica de grande importância nos processos físicos da atmosfera, e no planejamento urbano e agropecuário de uma região.

Apesar dos ventos desempenharem funções altamente benéficas para a vida humana, quando registram-se ventos de velocidades elevadas, normalmente de curta duração, os seus efeitos passam geralmente a ser danosos, como erosão dos solos, a mortandade de animais, acamamento de plantas, o destelhamento de prédios e a queda de redes de transmissão (LEITE & VIRGENS FILHO, 2003).

A essa variação brusca na velocidade do vento chamamos de rajadas, e geralmente é acompanhada por variações bruscas na direção. Determinar a ocorrência desses ventos fortes é de fundamental interesse para o planejamento das atividades sujeitas aos seus malefícios.

Vale salientar que a velocidade do vento é uma variável aleatória, ou seja, se caracteriza por intensas oscilações no tempo e no espaço, cuja rapidez e amplitude estão relacionadas com o estado de agitação do ar, que constituem a turbulência.

Portanto estudar o comportamento do vento é de suma importância para o fornecimento de informações sobre a instalação de quebra-ventos, aproveitamento eólico, aspectos relacionados a economia de água, conforto térmico e principalmente na qualidade do ar no transporte de poluentes.

Tendo em vista a expansão de interesses relacionados a utilização da energia eólica frente a necessidade de suprir as crises energéticas e aos impactos ao meio ambiente, cresce em âmbito nacional a exploração deste recurso para minimização do gasto energético do país, sendo necessário o conhecimento adequado das características do local a ser desenvolvida.

No entanto para identificação do potencial eólico é necessária a existência de uma série temporal de dados da velocidade e regime dos ventos, a uma altura adequada, da região referida.

Este trabalho tem como objetivo a caracterização do comportamento do vento através de suas variáveis, velocidade (U), direção (dd), índice de turbulência (I_t) e fator de rajadas (G) bem como realizar uma estimativa preliminar do potencial eólico para a região dos tabuleiros costeiros (Pilar, Alagoas).

2.0 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – DEFINIÇÃO DO VENTO

O ar em movimento, devido ao aquecimento e arrefecimento da superfície terrestre, forma-se, respectivamente, das zonas de baixas e altas pressões nas várias escalas espaciais. Para equilibrar essas diferenças de pressões o ar desloca-se de uma alta para uma baixa pressão, dando origem ao que chamamos de VENTO (BORBA, 2005), ou seja, são quaisquer movimentos do ar atmosférico, que ocorrem naturalmente no interior de um fluido, a superfície ou a grandes alturas (VIANELLO & ALVES, 2000).

O calor fornecido ao sistema termodinâmico atmosférico pode transformar-se, por exemplo, em energia cinética (movimento do ar), principalmente em virtude da maneira irregular como a energia distribui-se no Globo terrestre. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. A energia cinética, associada aos movimentos atmosféricos, poderá dissipar-se por efeitos friccionais, em contato com a superfície; nesse caso, a rugosidade do solo atua como um sumidouro da energia cinética, inibindo o deslocamento do ar, e transformando-a, novamente, em energia interna do sistema (VIANELLO & ALVES, 2000). Estes ainda sofrem uma deflexão devido a uma força resultante da rotação da Terra (força de Coriolis), explicando-se assim o sentido de rotação dos ciclones nos hemisférios Norte e Sul (HNS).

Pela dinâmica dos fluidos, sabe-se que um fluido qualquer é mais rápido no centro do que nas bordas da superfície de confinamento, devido ao atrito com a superfície, que tende a retardar o movimento. Quanto maior for a rugosidade da superfície, maior será a força de atrito (ROCHA, 1999). Da mesma maneira, o vento é mais lento próximo à superfície, onde o atrito faz uma força contrária ao movimento, diminuindo sua velocidade com relação às camadas superiores (COLE, 1980).

Segundo Vianello e Alves (2000) as componentes horizontais do vento são importantes também para o mecanismo termodinâmico da atmosfera, pois são eficientes transportadores de propriedades do fluido, tais como calor, massa e “momentum”. Nos baixos níveis, produz movimentos ascendentes e chuvas sobre uma região (BERNARDO & MOLION, 2000).

A componente vertical, embora possível de ser medida com o uso de equipamentos sofisticados, frequentemente é estimada por meio de teorias associadas às observações das componentes horizontais e de outras propriedades. Entretanto, os movimentos verticais, quando ocorrem, são extremamente importantes para a formação de nuvens e precipitações. Existem vários sistemas e processos termodinâmicos e/ou dinâmicos (de escalas micro, meso, macro) que influenciam diretamente e/ou indiretamente à circulação geral e local da atmosfera produzindo fenômenos de variabilidade na precipitação, na direção e na magnitude do vento à superfície (HOLANDA, 2003).

Embora o vento seja um parâmetro de grande importância para a compreensão de efeitos convectivos, em uma determinada área, não existe uma rede observacional que o meça de forma adequada para tal, ou para estudos de circulações de pequena escala, como por exemplo, circulações do tipo brisa. Os dados horários de ventos, existentes na Região Nordeste, não ultrapassam dez anos e correspondem a um pequeno número de estações, devido a região possuir poucas pesquisas realizadas (NÓBREGA et al., 2000).

Medidas da estrutura do perfil vertical do vento próximo às costas litorâneas têm sido realizadas recentemente. Entretanto, as condições e características da superfície influenciam o perfil de vento, sendo que não existem estudos que possam ser generalizados (FISCH, 1999). Segundo Bergstrom et al., (1988), os perfis de vento são mais intenso no interior do continente (1,5 km de distância da costa) do que sobre o oceano, provavelmente devido ao maior fluxo vertical da quantidade de movimento, consequência do aumento da turbulência.

Um estudo no litoral da Dinamarca mostra que a uma distância de 30km da costa, a velocidade do vento no nível de 24m é aproximadamente 20-30% inferior ao vento proveniente do oceano (SEMPREVIVA et al., 1990).

Observações da estrutura da turbulência, nestas condições, resultaram em teorias de similaridade que descrevem bem os fluxos turbulentos sobre terrenos homogêneos. A maioria destes experimentos foi realizada nas primeiras dezenas de metros da atmosfera. Esta camada inferior da atmosfera, chamada camada superficial, é amplamente estudada, por ser a porção da atmosfera mais acessível ao uso de torres micrometeorológicas equipada com instrumentos para medir a turbulência atmosférica (DA SILVA et al., 2000).

Entretanto, a compreensão da estrutura da turbulência atmosférica, em condições não homogêneas, é fundamental para obter-se uma descrição mais realista da dinâmica da camada limite, e conseqüentemente, melhorar os modelos de dispersão de poluentes, por exemplo.

2.1.1 – MECANISMOS DE GERAÇÃO DE VENTO

Os ventos se formam a partir do aquecimento e arrefecimento da superfície terrestre proveniente da radiação solar. 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 dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de "soprar", pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no Equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

De uma forma geral, os movimentos das massas de ar na atmosfera (vento) processam-se em regime turbulento. A quantidade de energia disponível no vento varia de acordo com as estações do ano e a hora do dia (CRESESB, 2006).

Ainda de acordo com o site da CRESESB (2006) para se obter um bom conhecimento do regime dos ventos não é suficiente basear-se na análise de dados de vento de apenas um ano; o ideal é dispor de dados referentes a vários anos. À medida que uma maior quantidade de dados anuais é coletada, as características levantadas do regime local dos ventos tornam-se mais confiáveis.

A Costa Leste do Nordeste (ENE) está imersa no campo dos ventos Alísios, ventos esses que são produzidos por configurações da circulação geral da atmosfera (ramo superficial da célula Hadley-Walker) e são intensificados ou enfraquecidos por circulações locais de mesoescala, como brisas do mar e da terra (BERNARDO & MOLION, 2000).

Um estudo realizado por Lyra (1998) verificou que, para Alagoas, a direção predominante do vento é comandada pelo sistema de grande escala, ventos alísios. Kousky (1980 – in MOURA et al., 1998) verificou que as brisas marítimas e terrestres atuam no litoral e na zona da mata do nordeste, durante todo o ano, porém observadas nos meses de outono e inverno.

2.2 – CARACTERIZAÇÃO DO VENTO

A caracterização do vento em qualquer ponto (a, g, z) da atmosfera requer dois parâmetros: a direção e a velocidade (módulo). Ambas são grandezas instantâneas e pontuais, pois o escoamento do ar depende das condições atmosféricas (que variam no espaço e com o tempo). Nas proximidades da interface superfície-atmosfera o vento é altamente influenciado pelas características geométricas e pelo estado de aquecimento da própria superfície adjacente (VAREJÃO-SILVA, 2001).

2.2.1 – DIREÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO

A direção do vento exprime a posição do horizonte aparente do observador a partir do qual o vento sopra. A direção é expressa em termos do azimute, isto é, do ângulo que o vetor velocidade do vento forma com o norte geográfico local (0°).

De acordo com Anderson (1971), a análise das influências topográficas sobre o campo de vento na camada limite planetária indica que as circulações associadas à topografia são determinantes para a definição das trajetórias do ar, apropriadas para avaliação do impacto da poluição atmosférica. Entretanto o conhecimento do campo de vento é limitado devido a observações esparsas, particularmente em regiões de terreno complexo, ou seja, locais que apresentam vales e montanhas.

Farias (1996) evidenciou a influência da rugosidade sobre o vento na camada limite noturna, comparando dois sítios com rugosidades diferentes: Pastagem e Floresta (ROCHA, 1999).

As regiões com topografia complexa podem causar grandes modificações em escoamentos de “meso” escala. O bloqueio, desvio e canalização do vento pelos contornos topográficos produzem perturbações que influenciam fortemente as circulações locais (OKE, 1987). Pellegrini et al., (2005) afirmam que o conhecimento da altura, da região interna, é essencial para a obtenção do campo de velocidades. A velocidade do vento em um determinado local aumenta drasticamente com a altura. A extensão pela qual a velocidade do vento aumenta com a altura é governada por um fenômeno chamado "wind shear" (Figura 01). Fricção entre ar mais lento e mais rápido conduz ao aquecimento, velocidade do vento mais baixa e muito menos energia de vento disponível perto do solo (FERREIRA & LEITE, 2006).

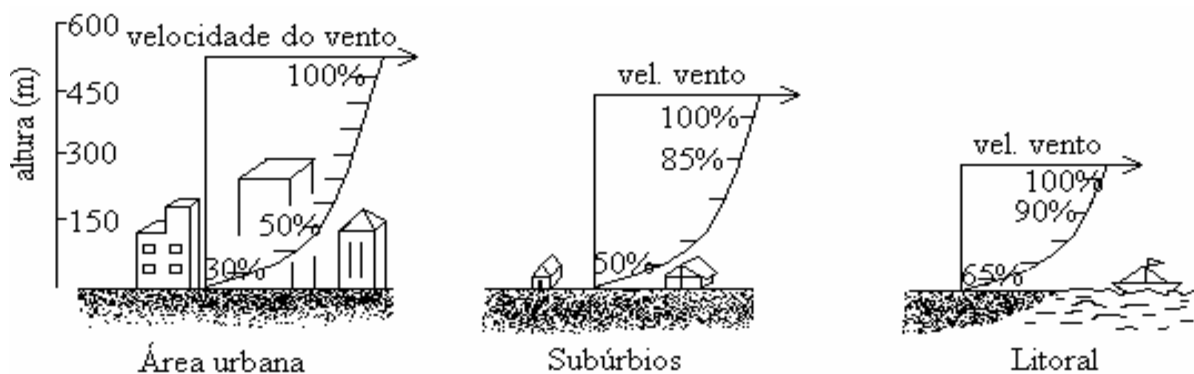


Figura 01 – Variação do vento com altura (FERREIRA & LEITE, 2006).

O conhecimento da direção predominante dos ventos pode fornecer subsídio para instalação de quebra-ventos, aproveitamento eólico, aspectos relacionados à economia da água e conforto térmico, e transporte de poluentes (BARBANO et al., 2001).

O módulo da velocidade do vento é normalmente expresso em metros por segundo ($m.s^{-1}$), em quilômetros por hora, ou em *knots* (kt). Um *knot* corresponde a um milha náutica (1852m) por hora (VAREJÃO-SILVA, 2001).

2.3 – RAJADAS E TURBULÊNCIA

A velocidade do vento à superfície varia bastante com o tempo e se caracteriza por intensas oscilações cuja rapidez e amplitude estão relacionadas com o estado de agitação do ar, que constituem a turbulência.

A turbulência atmosférica é resultante do movimento irregular do fluxo de ar e pode ser gerada pela convecção, orografia, edificações, jato, frentes, movimentação de aeronaves (Moreira, 1996).

A uma variação brusca na velocidade do vento chama-se Rajada. Em geral, a rajada é acompanhada por uma variação, igualmente brusca na direção. O vento à superfície normalmente apresenta rajadas. Por isso mesmo, as observações do vento à superfície, destinadas a fins climatológicos ou sinóticos (previsão do tempo) devem referir-se aos valores médios correspondentes a um intervalo de dez minutos (VAREJÃO-SILVA, 2001).

2.4 – ENERGIA EOLICA

A atual conjuntura energética não é sustentável para o século XXI e as fontes de combustíveis fósseis estão gradativamente tendendo ao esgotamento. Paralelamente, os impactos do uso de certas fontes de energia têm sido cada vez mais sentidos no meio ambiente. Frente a essa realidade, ocorre a necessidade de explorar outras fontes de energia, capazes de suportar o crescimento econômico e tecnológico dos países, e ainda, outro fator não menos importante, fontes “limpas”, causando mínima agressão ao meio ambiente (PES et al., 2005).

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia limpa e disponível em todos os lugares. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética do ar em energia elétrica de um rotor, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d’água (ANEEL, 2006), além de favorecer todas as atividades que dependem da energia elétrica, como a eletrificação rural (SILVA et al., 2000)

Atualmente, muitos cientistas, parecem considerar as energias renováveis como a única alternativa viável às fontes de energias atuais, onde as emissões não desejadas apresentarão uma tendência em ser minimizada (BORBA, 2005). Um dos

grandes problemas enfrentados pela sociedade diz respeito à questão energética, em virtude do seu consumo ser cada vez maior e de prevalecer grande dependência dos recursos não renováveis, que tem no petróleo sua principal fonte. Algumas nações, antevendo as graves conseqüências dessa dependência, têm dedicado alguma atenção aos projetos relacionados com a utilização de fontes de energias alternativas. Dentre essas fontes, uma tem recebido grande destaque: a energia eólica (SILVA et al., 2002).

A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia. No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão (CBEE, 2006).

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. Em 1991, a Associação Européia de Energia Eólica estabeleceu como metas a instalação de 4.000 MW de energia eólica na Europa até o ano 2000 e 11.500 MW até o ano 2005. Essas e outras metas estão sendo cumpridas muito antes do esperado (4.000 MW em 1996, 11.500 MW em 2001). As metas atuais são de 40.000 MW na Europa até 2010. Nos Estados Unidos, o parque eólico existente é da ordem de 4.600 MW instalados e com um crescimento anual em torno de 10%. Estima-se que em 2020 o mundo terá 12% da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200GW (WINDPOWER; EWEA, 2006).

A avaliação de um potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e regime de ventos. Geralmente, uma avaliação rigorosa requer levantamentos específicos, mas dados coletados em aeroportos, estações meteorológicas e outras aplicações similares podem fornecer uma primeira estimativa do potencial bruto ou teórico de aproveitamento da energia eólica (GRUBB & MEYER, 1993).

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50m,

o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m.s⁻¹ (GRUBB & MEYER, 1993). Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento possui uma velocidade média igual ou superior a 7 m.s⁻¹, a uma altura de 50 m. Essa proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 32% na Europa Ocidental.

2.4.1 – COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO

A quantidade de energia eólica extraível numa região depende das características de desempenho, altura de operação e espaçamento horizontal dos sistemas de conversão de energia eólica instalados. A avaliação precisa do potencial de vento em uma região é o primeiro e fundamental passo para o aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia (AMBIENTEBRASIL, 2006).

A CRESESB (2006) diz que para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

- Vento: Disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico;
- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação;
- Transmissão e Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga;
- Gerador Elétrico: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica;
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc;
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente;
- Sistema de Armazenamento: Responsável por armazenar a energia para produção de *energia firme* a partir de uma fonte intermitente;
- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica;
- Acessórios: São os componentes periféricos.

As hélices de uma turbina de vento são diferentes das lâminas dos antigos moinhos porque são mais aerodinâmicas e eficientes. As hélices têm o formato de asas de aviões e usam a mesma aerodinâmica. As hélices em movimento ativam um eixo que está ligado à caixa de mudança. Através de uma série de engrenagens a velocidade do eixo de rotação aumenta. O eixo de rotação está conectado ao gerador de eletricidade que com a rotação gera energia (AMBIENTEBRASIL, 2006).

Todo sistema eólico somente começa a funcionar a partir de uma certa velocidade, chamada de velocidade de entrada, que é necessária para vencer algumas perdas. Quando o sistema atinge a chamada velocidade de corte um mecanismo de proteção é acionado com a finalidade de não causar riscos ao rotor e à estrutura (AMBIENTEBRASIL, 2006).

Projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada, supõe trabalhar no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação a curva de potência disponível do vento local. Isto requer encontrar uma relação de multiplicação, de maneira que se tenha um bom acoplamento rotor/carga. É necessário também, ter mecanismos de controle apropriados para melhorar o rendimento em outras velocidades de vento e aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico. Como uma primeira aproximação, o rendimento global de um sistema eólico simples pode ser estimado em 20% (AMBIENTEBRASIL, 2006).

2.4.2 – ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenham sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos, multipás para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado (BORBA, 2005).

Os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha (PE), no início dos anos 90. Os resultados dessas medições possibilitaram a determinação do potencial eólico local e a instalação das primeiras turbinas eólicas do Brasil (ANEEL, 2006). Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificados, em Minas Gerais, por exemplo, uma central

eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa) com excelentes condições de vento.

A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com turbinas eólicas de médio e grande portes conectadas à rede elétricas. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas: Bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações (dados de superfície) e das diferentes metodologias empregadas (ANEEL, 2006).

Ocorre que até hoje não houve interesse em levantar, tecnicamente, o potencial eólico brasileiro, especialmente ao longo dos 7.500 km de litoral. As medições conhecidas foram feitas apenas nos estados do Ceará, Paraná, Santa Catarina, Rio de Janeiro, Pernambuco e na Ilha de Marajó, Pará. Como, em geral, o interior do país tem menos ventos do que o litoral é nessa faixa do território que ocorreram as principais medições, o que não significa que a energia eólica só poderá ser produzida nas praias. Na cidade de Palmas, capital do estado de Tocantins, é uma prova irrefutável de que há vento forte e estável também no interior (BORBA, 2005).

De qualquer forma, os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento (locais, regionais e nacionais) têm dado suporte e motivado a exploração comercial da energia eólica no País. Os primeiros estudos foram feitos na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco. Com o apoio da ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT, o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, publicou em 1998 a primeira versão do *Atlas Eólico da Região Nordeste* (ANEEL, 2006).

De acordo com Silva et al. (2002), a identificação do potencial eólico de uma localidade é tarefa fundamental e tem como requisito básico e indispensável, a existência de uma série temporal de observações da velocidade e direção do vento a uma altura adequada. No NEB há registros de velocidades médias horárias do vento, obtidas a 10m de altura, em 77 estações climatológicas pertencentes ao

INMET. Como o NEB é influenciado pelos ventos alísios e eles oscilam de intensidade e direção entre o oceano e o continente, tais estudos devem caracterizar a variabilidade do potencial existente entre a zona costeira e a zona continental.

Filgueiras & Silva (2003 – in BORBA, 2005) verificou que a velocidade média do vento no NEB é de $8,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, com nível baixo de turbulência o ano inteiro. O fator de forma de Weibull – k – é excepcionalmente elevado, maior que 3, valor considerado alto (indicativo de turbulência baixa) quando comparado com ventos registrados na Europa e nos Estados Unidos, e uma indicação de sentido constante do vento (vento quase unidirecional).

Pesquisas na área de energia eólica no NEB também vêm sendo realizadas pelo Centro Brasileiro de Testes de Turbinas Eólicas (CBTTE), ligado a UFPE, onde instalará a segunda turbina em Olinda – PE. Esta nova turbina poderá gerar até 500 mil kWh por ano, o bastante para iluminar 60 prédios, como as igrejas das ladeiras históricas de Olinda (PIRES, 2006).

Segundo Borba (2005) o Ceará é hoje quem abriga os maiores parques eólicos nacionais. A cidade de Taíba com 10 aerogeradores e potência conjunta de 5 MW, Prainha de Aquiraz com 20 aerogeradores e potência de 10 MW. De acordo com a CBEE (2006), o potencial eólico existente no NEB é de 6.000 MW.

2.4.3 – CUSTO – BENEFÍCIOS

Na crise energética atual, as perspectivas da utilização da energia eólica são cada vez maiores no panorama energético geral, pois apresentam um custo reduzido em relação a outras opções de energia.

Considerando o grande potencial eólico existente no Brasil, confirmado através de medidas de vento precisas realizadas recentemente, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas. Análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do Brasil, mostram a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$ 70 - US\$ 80 por MWh (CBEE, 2006). O custo dos geradores eólicos é elevado, porém o vento é uma fonte inesgotável de energia, e as plantas eólicas têm retorno financeiro a curto prazo.

Os custos associados à instalação de aproveitamentos eólicos dependem fundamentalmente dos custos de instalação e do tipo de tecnologia usada, sendo,

por isso, muito variáveis em função das fundações, acessos, transportes, ligação a rede, número de turbinas altura do rotor, tipo de gerador, sistema de controle (CASTRO, 2003).

De acordo com estudos da ELETROBRÁS, o custo da energia elétrica gerada através de novas usinas hidroelétricas construídas na região amazônica será bem mais alto que os custos das usinas implantadas até hoje. Quase 70% dos projetos possíveis deverão ter custos de geração maiores do que a energia gerada por turbinas eólicas. Outra vantagem das centrais eólicas em relação às usinas hidroelétricas é que quase toda a área ocupada pela central eólica pode ser utilizada (para agricultura, pecuária, etc.) ou preservada como habitat natural.

A energia eólica poderá também resolver o problema do uso da água do Rio São Francisco no Nordeste (água para gerar eletricidade versus água para irrigação). 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 (CBEE, 2006).

Os custos de operação e manutenção incluem: serviços, reparos, seguro, administração, aluguel do local. Estudos recentes estimam que os custos de operação e manutenção, para aerogeradores entre 450kW e 500kW, variam entre 1,9 e 2,9 dólares/ kWh dos quais metade corresponde ao seguro. A taxa de consumo de energia elétrica para o estado de Alagoas está hoje cerca de aproximadamente 0,39 reais/kWh (BORBA, 2005).

Os aerogeradores modernos produzem, hoje em dia, eletricidade a preço competitivo. Os custos de energia foram reduzidos de 35 dólares/kWh em 1980 para os valores atuais em torno de 6 dólares/kWh em locais com bons recursos eólicos (SARTORETTO & ZANATTA, 1999).

O mais importante parâmetro para o cálculo da viabilidade de um investimento é o conhecimento dos recursos eólicos do local. Teoricamente a energia produzida varia diretamente com o quadrado da velocidade média do vento e a potência varia com o cubo da velocidade, ou seja, o potencial produzido por um aerogerador varia com a velocidade do vento segundo a curva potencial desse mesmo aerogerador e a energia produzida será a integral da potência produzida durante o tempo que estiver em funcionamento (BORBA, 2005).

2.4.4 – IMPACTOS E PROBLEMAS

Apesar de não queimarem combustíveis fósseis e não emitirem poluentes, fazendas eólicas não são totalmente desprovidas de impactos ambientais. Elas alteram paisagens com suas torres e hélices e podem ameaçar pássaros se forem instaladas em rotas de migração. Emitem um certo nível de ruído (de baixa frequência), que pode causar algum incômodo. Além disso, podem causar interferência na transmissão de televisão (AMBIENTEBRASIL, 2006).

As vantagens principais da geração de eletricidade das fontes renováveis são ausência de emissões e a disponibilidade infinita do princípio que converte a energia em eletricidade (SLOOTWEG & KLING, 2003). Garcia et al. (1998), ainda comenta da relevância do seu caráter não poluente, onde considera que a geração de 1.649 GWh de energia extraída dos ventos, em substituição a outras fontes convencionais, evitaria o lançamento de $1,3 \times 10^6$ toneladas de CO₂ na atmosfera terrestre, o que representaria contribuição de grande importância para o ambiente global.

Outra vantagem interessante é na montagem em campo das turbinas eólicas, que é simples e rápida. A operação de uma usina desta é extremamente menos complexa do que na usina termoelétrica de mesma potência, que tem que lidar com captação e tratamento, mais o descarte de água e armazenamento de combustível, controle de caldeiras, manutenção de tubulações de vapor entre outros.

De acordo com Sánchez et al. (2002) as desvantagens da energia eólica incidem principalmente nos fatores estéticos. No entanto Sartoretto e Zanatta (1999 – in BORBA, 2005) afirmam que existem efeitos incomodativos que podem ser contabilizados tais como: o efeito de sombras em movimento e reflexões intermitentes. O primeiro pode ser evitado com uma correta planificação dos parques. O segundo, devido à incidência dos raios solar sobre as pás em movimento, pode ser evitados utilizando pinturas opacas. Para solucionar o problema da alteração de paisagens, os europeus utilizaram o sistema “offshore”, ou seja, a instalação de turbinas no mar, em áreas de baixa profundidade (3 a 4 m), distantes da terra entre 1 e 5 km.

Outro problema que pode se citado é que em regiões onde o vento não é constante, ou a intensidade é muito fraca, obtêm-se pouca energia e quando ocorrem chuvas muito fortes, há desperdício de energia.

Apesar de as eólicas da primeira geração terem provocado alguns incômodos do ponto de vista sonoro, atualmente, os avanços tecnológicos permitiram uma considerável redução do ruído provocado por estes aproveitamentos energéticos. Com efeito, numa escala de ruído, a eólica situa-se entre o barulho provocado por um vento ligeiro e o do interior de uma habitação, ou seja, cerca de 45 dB. A evolução do nível sonoro em função do número de eólicas apresenta um crescimento logarítmico isto é, a instalação de uma segunda eólica aumenta o nível sonoro de apenas 3 dB, em vez de o duplicar (REVUE SCIENCES ET AVENIR, 2004).

Para diminuir os incômodos sonoros:

- os multiplicadores são especificamente concebidos para as eólicas. Atualmente, privilegiam-se os acoplamentos diretos isto é, acoplamentos sem multiplicador.

- os perfis das pás são objeto de estudos aerodinâmicos, afim de reduzir o ruído provocado pelo trajeto do vento nas pás ou à emissão de ruído proveniente do núcleo ou da torre. Os eixos de transmissão são equipados de amortecedores para limitar as vibrações.

- o isolamento sonoro (acolchoado) do núcleo contribui, igualmente, para a redução do ruído.

As vantagens de energia eólica parecem superar as suas desvantagens. A tecnologia de eletricidade a partir da energia eólica pode considerar-se atualmente como uma tecnologia significativa (AVIA, 2001).

2.4.5 – PROJETOS DE ENERGIA EÓLICA

Apesar de vários trabalhos e pesquisas científicas realizadas nas décadas de 70 e 80 a geração de energia a partir de turbinas eólicas no Brasil teve início apenas em julho de 1992, com a instalação de uma turbina de 75kW na ilha de Fernando de Noronha, através de iniciativa pioneira do Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, na época conhecido como Grupo de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco. Os principais projetos de energia eólica do Brasil são mostrados na figura 02.



Figura 02 – Projetos de energia eólica no Brasil (CBEE, 2006).

Embora o mercado de usinas eólicas esteja em crescimento no Brasil, ele já movimentava 2 bilhões de dólares no mundo. Existem 30 mil turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. A energia eólica pode garantir 10% das necessidades mundiais de eletricidade até 2020, pode criar 1,7 milhão de novos empregos e reduzir a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 bilhões de toneladas (AMBIENTEBRASIL, 2006).

Durante os últimos 15 anos, diversos projetos pioneiros foram realizados pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica, através de convênios com instituições governamentais e privadas. Os projetos/convênios mais representativos são apresentados abaixo:

- CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) - Projeto da primeira turbina eólica de grande porte do Brasil conectada à rede elétrica na Ilha de Fernando de Noronha;
- CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) - Projeto básico: Locação e medidas da primeira central eólica do Brasil - 1MW em Gouveia – MG;
- INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) - Projeto para promoção de energia eólica no setor rural do Brasil, cadastramento e elaboração de banco de dados, fornecimento de assistência a propriedades rurais no Brasil, análise técnica e econômica de casos típicos;

- COELBA (Companhia Energética do Estado da Bahia) - Análise do potencial eólico e estudos de viabilidade econômica para diversos grupos do setor privado;
- COELCE (Companhia Energética do Ceará) - Análise do potencial eólico e estudos de viabilidade econômica para diversos grupos do setor privado;
- CEAL (Companhia Energética de Alagoas) - Análise do potencial eólico e estudos de viabilidade econômica para diversos grupos do setor privado;
- CNPq/PTU (Programa do Trópico Úmido) - Projeto, instalação e instrumentação de sistema híbrido para eletrificação da Ilha de Tamaruteua, localizada no município de Marapanim, Pará (cooperação com a Universidade Federal do Pará);
- MMA (Ministério de Meio Ambiente e Amazônia Legal) - Projeto de instalação da turbina OWW-225 (225kW) no Centro Brasileiro de Energia Eólica;
- BNB (Banco do Nordeste do Brasil) - Projeto de sistemas híbridos de pequeno porte para eletrificação rural na região Nordeste;

3.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – AREA DE ESTUDO

Os dados utilizados para elaboração deste trabalho foram coletados durante a execução do projeto MICROMA – Micrometeorologia da Mata Atlântica Alagoana (LYRA, 1998), localizado na Fazenda Vila Nova, município de Pilar (9°36'12" S; 35°53'46" W; 170 m) no estado de Alagoas, desde Junho de 1996 a Setembro de 1998. O experimento foi instalado numa região plana (tabuleiro) conhecida como Chã do Pilar. A estação foi instalada em meio a uma cultura de cana de açúcar situada a 1,3 km a Leste do km 26 da BR 316 (Figura 03).

O estado de Alagoas apresenta um clima tropical com variação entre quente/úmido e quente/seco, com chuvas concentradas no outono e inverno. A precipitação média anual é da ordem de 1000mm, sendo o período de abril a julho correspondente a estação chuvosa e o período de setembro a dezembro a estação seca. Precipitações acontecem em todos os meses do ano, com máximos na região litorâneos e mínimos no oeste do estado.

Devido à presença de serras que impedem a passagem do vento úmido o clima torna-se quente e seco, com evaporação excessiva e muito calor, na parte central do estado. Sendo assim a temperatura média anual de Alagoas varia entre 21°C e 29°C, mas na faixa litorânea as temperaturas são menos elevadas. Ou seja, na parte oriental do estado o clima é úmido com temperaturas entre 19°C e 28°C, com chuvas abundantes e na parte ocidental, o clima é semi-árido, com temperaturas oscilantes entre 13°C e 40°C, dependendo da estação do ano (JÚNIOR, 2002).



Figura 03 – Localização do projeto MICROMA na Fazenda Vila Nova, no município de Pilar ($9^{\circ}36'12''S$; $35^{\circ}53'46''W$; 170m).

Sobre a região do Pilar, de acordo com Nicácio (2002), encontramos um clima quente e úmido com período chuvoso entre os meses de março a Agosto e o período seco de Setembro a Fevereiro.

O clima de Alagoas sofre a influência local do relevo, altitude, direção das estruturas mais elevadas e das calhas dos rios que canalizam ventos portadores de umidade. Segundo Lavina (2006), cerca de 86% do território alagoano se encontra abaixo de 300m de altitude, e 61% abaixo de 200m. Apenas um por cento fica acima de 600m. Cinco unidades compõem o quadro morfológico: (1) a baixada litorânea, com extensos areais (praias e restingas) dominados por elevações de topo plano (tabuleiros areníticos); (2) uma faixa de colinas e morros argilosos, imediatamente a oeste, com solos espessos e relativamente ricos; (3) o pediplano, ocupando todo o interior, com solos ricos, porém rasos, e uma topografia levemente ondulada, da qual despontam as serras de Mata Grande e Água Branca, no extremo oeste do estado; (4) a encosta meridional do planalto da Borborema, no centro-norte, parte mais elevada de Alagoas; (5) e planícies aluviais (várzeas), ao longo dos rios, inclusive o delta e a várzea do baixo São Francisco (margem esquerda), com solos anualmente renovados por cheias periódicas.

Três tipos de cobertura vegetal, em grande medida modificados pela ação do homem, revestiam o território alagoano: a floresta tropical na porção úmida do estado (microrregião da mata alagoana); o agreste, vegetação de transição para um clima mais seco, no centro; e a caatinga, no oeste.

3.2 – MEDIDAS REALIZADAS

A estação meteorológica automática (EMA) possui um sistema de aquisição de dados (Datalogger, modelo CR 10 da Campbell Scientific inc. – USA), abastecida por energia solar captada em um painel fotovoltaico e armazenada em uma bateria. Os dados de vento, saldo de radiação (R_n), temperatura (T) e umidade relativa (UR), foram adquiridos por sensores instalados numa torre de 12m.

As variáveis meteorológicas coletadas continuamente, a cada segundo, tiveram sua média registrada a uma frequência pré – estabelecida (Tabela 01). As médias do vento (velocidade (ff) e direção (dd)), foram feitas através de um sensor R. M. YOUNG (modelo 03001-5). O sensor possui uma sensibilidade para velocidade de $0,50 \text{ m.s}^{-1}$ e direção de 5° a 10° .

TABELA 01 – Frequência do registro e altura do sensor de velocidade (ff1 a ff4) e direção (dd1 a dd4).

	INICIO	FIM	FREQUENCIA DE AQUISIÇÃO	FREQUENCIA DE REGISTRO	ALTURA DO SENSOR
FASE 01 (A)	25/06/1996	09/08/1996	1s	06 minutos	2,59 a 9,84 metros
FASE 01 (B)	10/08/1996	08/09/1996	1s	06 minutos	3,00 a 9,84 metros
FASE 01 (C)	09/09/1996	10/03/1997	10s	10 minutos	3,00 a 9,84 metros
FASE 02 (A)	02/04/1997	19/06/1997	10s	10 minutos	2,01 a 8,29 metros
FASE 02 (B)	20/06/1997	24/07/1997	10s	10 minutos	2,63 a 8,29 metros
FASE 02 (C)	25/07/1997	04/09/1997	10s	10 minutos	3,03 a 8,29 metros
FASE 02 (D)	05/07/1997	24/09/1997	10s	10 minutos	3,62 a 8,29 metros
FASE 03	25/11/1997	21/09/1998	10s	10 minutos	3,62 a 8,29 metros
FASE 04	01/01/1999	21/09/1999	10s	10 minutos	3,62 a 8,29 metros

Os dados coletados foram armazenados no Datalogger, e em seguida transferidos para um cartucho, onde foi conduzido para o laboratório e descarregados em microcomputadores. Essa transferência de dados foi realizado a cada 10 dias.

Depois de armazenados nos microcomputadores os dados foram transferidos para planilhas, uma para cada dia de coleta, onde foram realizados os cálculos médios diários horários e médios diário mensais, para a Velocidade do Vento (U), Direção (dd), Índice de Turbulência (It), Fator de Rajadas (G), Estimativa do Vento a 75m e Potencial Eólico.

Para a realização dos cálculos foi feita uma filtragem dos dados retirando da velocidade do vento, todos os horários onde os valores foram iguais ou menores $0,20 \text{ m.s}^{-1}$, por causa da velocidade de partida do anemômetro.

3.3 – TRATAMENTO DOS DADOS

Na realização deste trabalho foram utilizados dados do vento em todas as alturas observadas desde julho de 1996 a Setembro de 1998 onde foi feita a separação dos mesmos em arquivos mensais, diários e horários.

Foram realizados cálculos para estudo da velocidade média, fator de rajadas e intensidade de turbulência. Também foi estimada a velocidade do vento a uma altura de 75m para caracterização deste na utilização deste na produção de energia eólica.

Com os resultados encontrados foram gerados gráficos para cada mês observado durante os três anos. Deve-se ressaltar que devido a localização da estação houve intervalos entre as coletas por conta do período de colheita dos canaviais. Sendo assim alguns meses apresentam falhas as informações sobre velocidade e direção do vento.

3.3.1 – CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA

Para o cálculo da velocidade média do vento resultante utilizou-se a metodologia proposta por Teixeira (1978), que também foi utilizada por Rocha (1999). Este cálculo dá-se através da decomposição vetorial das suas componentes zonal (CZ) e meridional (CM).

A componente zonal é a decomposição do vetor no eixo E-W meteorológico (eixo X trigonométrico), e a componente meridional é a decomposição do vetor no eixo N-S meteorológico (eixo Y trigonométrico).

Para o cálculo das componentes é utilizado o sentido em que o vento vai (para onde ele sopra, direção real), como na meteorologia a direção (dd) medida é de onde o vento (ff) vem (de onde ele sopra, direção meteorológica).

$$CZ = u = -ff \text{ sen } dd \quad (1)$$

$$CM = v = -ff \text{ cos } dd \quad (2)$$

As componentes do vento médio, em qualquer direção, são iguais a média simples das componentes individuais do vento ao longo da mesma direção. Com a

média diária das componentes zonal e meridional, calculou-se o valor da velocidade média diária do vento resultante, que é dada pela equação 3:

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (3)$$

onde: \bar{u} – Média diária da componente meridional;

\bar{v} – Média diária da componente zonal;

\bar{U} – Média diária da velocidade do vento resultante (m.s⁻¹).

3.3.2 – FATOR DE RAJADAS

De acordo com Fisch (1999) o estudo das rajadas de vento é uma das formas de se analisar a estrutura da turbulência de um determinado local, sendo que estas podem ser definidas como aumento/diminuição repentina da velocidade do vento em ciclos muito pequenos e contínuos. O fator ou pico de rajadas (G) é um parâmetro de engenharia normalmente utilizado para estabelecer quanto os valores máximos (U_{\max}) são superiores aos valores médios (\bar{U}).

$$G = \frac{U_{\max}}{\bar{U}} \quad (4)$$

3.3.3 – INDICE DE TURBULENCIA

A intensidade de turbulência relaciona a variabilidade da medida do vento (σ_u) com o valor médio (\bar{U}):

$$I_t = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad (5)$$

em que: I_t - Índice de Turbulência;

σ_u - desvio padrão da velocidade do vento;

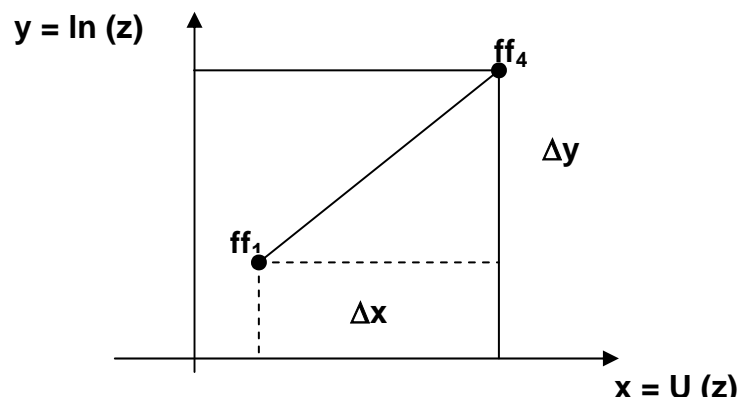
\bar{U} - Velocidade média do vento.

3.3.4 – ESTIMATIVA DO VENTO E POTENCIAL EÓLICO

Para fins climatológicos a altura padrão da medida da velocidade do vento é 10m, mas a necessidade do estudo do potencial eólico de uma região pode ser até de 80m, altura central das turbinas. Portanto foi estipulado o vento médio a uma altura de 75m (z), a partir dos ventos médios diários (ff1 a ff4) encontrados nas alturas (ff1 a ff4) medidas no experimento.

Os cálculos foram feitos a partir da correlação entre os ventos medidos (U) e as alturas estabelecidas (z):

$$U(75m) = \ln(75) - \frac{a}{b} \quad (6)$$



$$\text{Inclinação} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \Rightarrow \alpha = \frac{y}{x} \Rightarrow x = \alpha y; u(z) = \alpha \ln(z).$$

$$\text{Então com o dado observado é obtido } \alpha: u(75m) = \alpha \ln(75) \quad (7).$$

Após os cálculos para estimativa da velocidade do vento a 75m, o mesmo foi utilizado para o cálculo do potencial eólico na região do Pilar – Al, através da equação (FEITOSA et al., 2003):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho * V^3 \quad (8)$$

Onde: $\frac{P}{A}$ – Potencial Eólico (W.m⁻²);

ρ – massa específica do ar em kg/m³ ($\rho = 1.225$ kg/m³);

V – Velocidade do vento (m.s⁻¹).

4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – VARIAÇÕES INTERANUAL

Será discutida a seguir a variação interanual do vento na região do Pilar durante quatro anos consecutivos (1996/1997/1998/1999). As variáveis analisadas foram a velocidade do vento (U), a direção do vento (dd), a Intensidade de Turbulência (It) e o Fator de rajadas (G).

4.1.1 – VELOCIDADE DO VENTO (U)

A velocidade do vento (Figura 04) é maior durante os meses de verão e menor no inverno, ou seja, verifica-se com bastante nitidez a variação sazonal. Observou-se que os anos de 1997 e 1998 apresentaram uma diminuição dos seus valores principalmente nos meses de inverno, por conta do fenômeno *El niño* que tende neste período a diminuir a velocidade do vento como será discutido posteriormente.

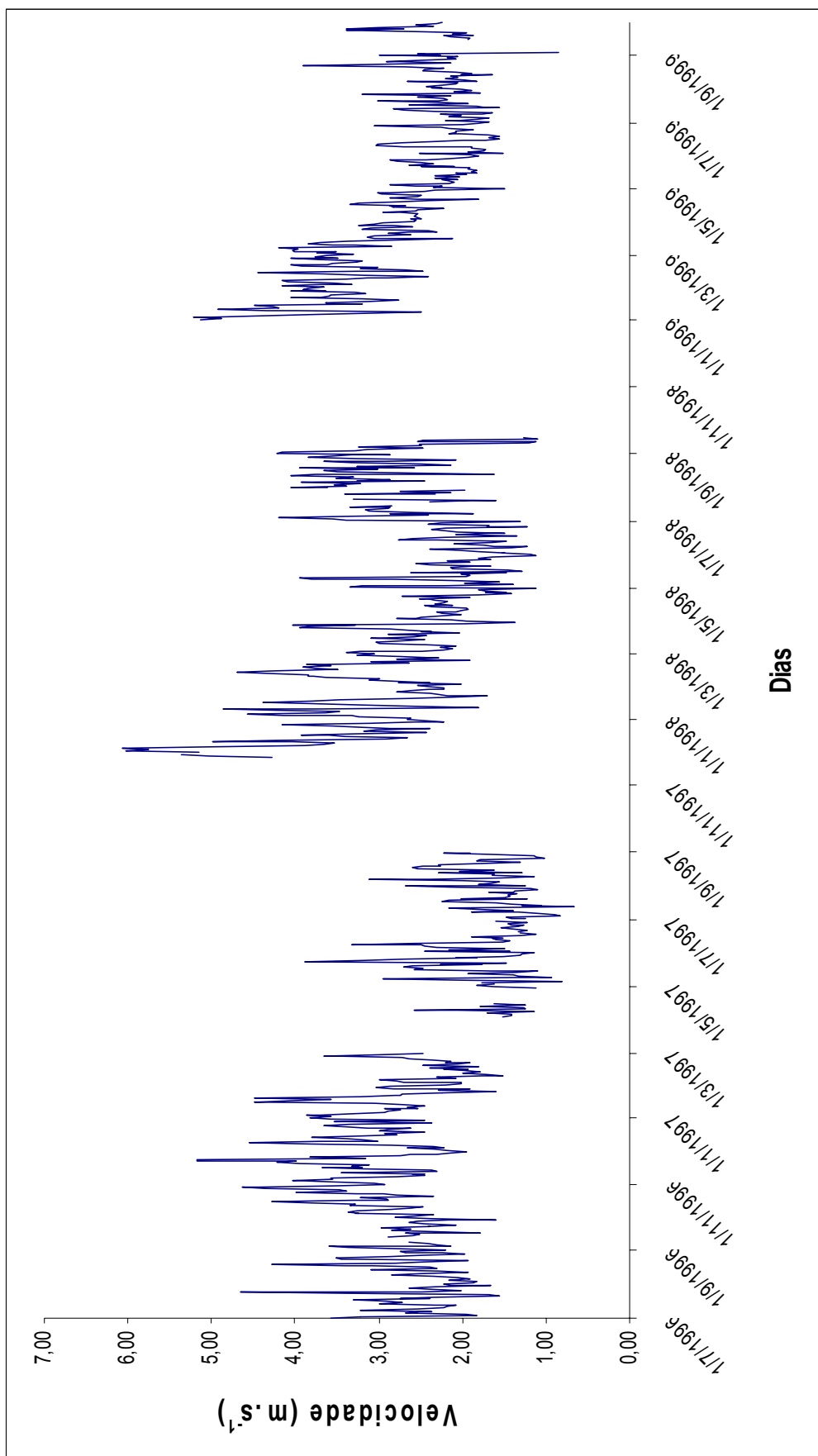


Figura 04 – Evolução da Velocidade média do Vento (m.s⁻¹) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999.

A série apresenta algumas falhas devido a interrupção da coleta de dados, conforme podemos verificar na tabela 02. Nela observamos que o inverno de 1997 (julho e agosto) apresentou valores abaixo da média encontrada nos demais, fato explicado por este ano ser um ano de *El Niño* (ROCHA, 1999), evento que enfraquece os ventos alísios no período de inverno e intensifica durante o período de verão, principalmente no final da primavera.

TABELA 02 – Média mensal da velocidade do vento (m.s^{-1}) durante os anos de 1996/1997/1998/1999, para a região do Pilar-AL.

	1996	1997	1998	1999
JANEIRO	-	2,99	3,08	3,87
FEVEREIRO	-	2,32	3,26	3,48
MARÇO	-	-	2,70	3,19
ABRIL	-	1,57	2,11	2,65
MAIO	-	1,91	2,10	2,20
JUNHO	-	1,71	1,88	2,10
JULHO	2,55	1,50	2,77	2,18
AGOSTO	2,54	1,82	3,19	2,34
SETEMBRO	2,51	-	1,98	2,33
OUTUBRO	3,24	-	-	-
NOVEMBRO	3,26	4,83	-	-
DEZEMBRO	3,07	3,74	-	-

A velocidade média para todo o período estudado foi $2,62 \text{ m.s}^{-1}$, o valor máximo registrado foi no dia 05 de dezembro de 1997 quando o vento atingiu uma velocidade de $6,07 \text{ m.s}^{-1}$, e o valor mínimo de $0,67 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 03 de maio de 1997.

O fato do vento diminuir no inverno certamente está ligado a uma influência das brisas marítimas e terrestres na região. De acordo com Lyra (1998) a região do tabuleiro costeiro é fortemente influenciada pela circulação de grande escala (ventos alísios) e pelas brisas costeiras. No inverno, a diferença de temperatura oceano-contidente diminui e com isso há uma atenuação da brisa marítima e uma maior variabilidade na direção do vento (ROCHA & LYRA, 2000).

A energia cinética associada aos movimentos atmosféricos, poderá se dissipar por efeitos friccionais, em contato com a superfície terrestre, nesse caso a rugosidade da superfície atua como sumidouro da energia cinética, inibindo o deslocamento do ar (VIANELLO & ALVES, 2000). Neste sentido, a diminuição da velocidade do vento na região do Pilar, no inverno, pode estar associada ao cultivo da cana-de-açúcar, que cria uma rugosidade maior quando esta se encontra em idade adulta. Além do atrito encontrado pela velocidade do vento, podemos citar a

influência do efeito gerado pelo aquecimento do ar em contato com a superfície terrestre, o que provocaria movimentos convectivos, ou seja, movimentos ascendentes que levaria calor da superfície para a atmosfera, e com isso gerando turbilhões no deslocamento do ar e conseqüente retardo no seu deslocamento horizontal.

Também é correto afirmar que a velocidade do vento está relacionada ao aquecimento da superfície por conta do gradiente de pressão provocado entre terra e oceano. Então é de se esperar que nos meses mais quentes a velocidade do vento seja mais intensa, assim como nos horários de pico máximo da chegada de radiação solar na Terra. Esta afirmação pode ser constatada quando observamos na figura 04 que a velocidade do vento tende a crescer à medida que se aproxima o verão, e em seguida seus valores vão diminuindo gradativamente. Alguns picos registrados também podem está associado aos fenômenos de maiores escalas que influenciam o regime de ventos no NEB, intensificando ou inibindo a velocidade do vento. Segundo Holanda (2003), variação do posicionamento da ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul – influencia na variabilidade sazonal dos ventos, tanto em velocidade quanto em direção.

Outro sistema que influencia no comportamento do vento são as ondas de leste, ou seja, ondas que se formam no campo da pressão atmosférica, ao longo dos alísios, na faixa tropical do Globo, deslocando-se de leste para oeste, até atingir o litoral e Zona da Mata da região nordeste, principalmente no inverno (VIANELLO, 2000). De acordo com Silvestre (1996) estes distúrbios existem através do ano todo com diferentes comprimentos e que nas estações de verão (DJF) se deslocam atingindo a costa norte do NEB; tendo no verão um comprimento de onda de 6000 Km a 7000 Km, e velocidade de fase de 10 m.s^{-1} a 14 m.s^{-1} .

4.1.2 – DIREÇÃO DO VENTO

A evolução da direção do vento durante o período de julho de 1996 a setembro de 1998 é mostrada na Figura 05. Devido a falta de dados não foi possível acompanhar esta variável no ano de 1999. Assim como no caso da velocidade, também foi observada uma variação sazonal da direção do vento, por conta dos sistemas que atuam na região em diferentes períodos.

No inverno de 1996 o vento predominante é Sudeste e à medida que se aproxima o verão muda para Nordeste. Observamos algumas variações bruscas de direção, por conta dos efeitos locais que alteram o sistema de circulação. Um desses efeitos seriam as Brisas, como já verificado por Lyra (1998), pois durante o dia a Brisa marítima que sopra do oceano tem direção **SE** com alguns eventos de Nordeste (ventos alísios), e a noite a direção muda por conta da Brisa terrestre que de acordo com Rocha (1999), consegue vencer o vento produzido pelo sistema de grande escala, nas estações de outono/inverno. Segundo o autor o estudo realizado a partir das componentes meridional e zonal mostra-se bastante eficaz na determinação de brisas terrestres.

Verifica-se que no inverno de 1997 o vento praticamente tem direção Sudeste com alguns episódios de **NE** (junho e julho). O que poderia ocasionar essa mudança seria o deslocamento da ASAS que no inverno encontra-se mais próximo ao Equador desintensificando os ventos nesta direção, pois como constatado por Santos et al. (2004) a maior frequência de ventos de Sudeste acontecem nos meses de outubro/janeiro/fevereiro e março quando nestes meses os ventos são mais intensos. Além disso, neste ano observou-se o fenômeno *El Niño*, que provoca uma mudança em grande escala na configuração local, sendo percebida uma mesma direção dos meses de verão.

Em 1998, ao contrário do que ocorre em 1997, a variabilidade é menor, sendo esse um ano de transição do fenômeno de *El niño* para *La Niña*.

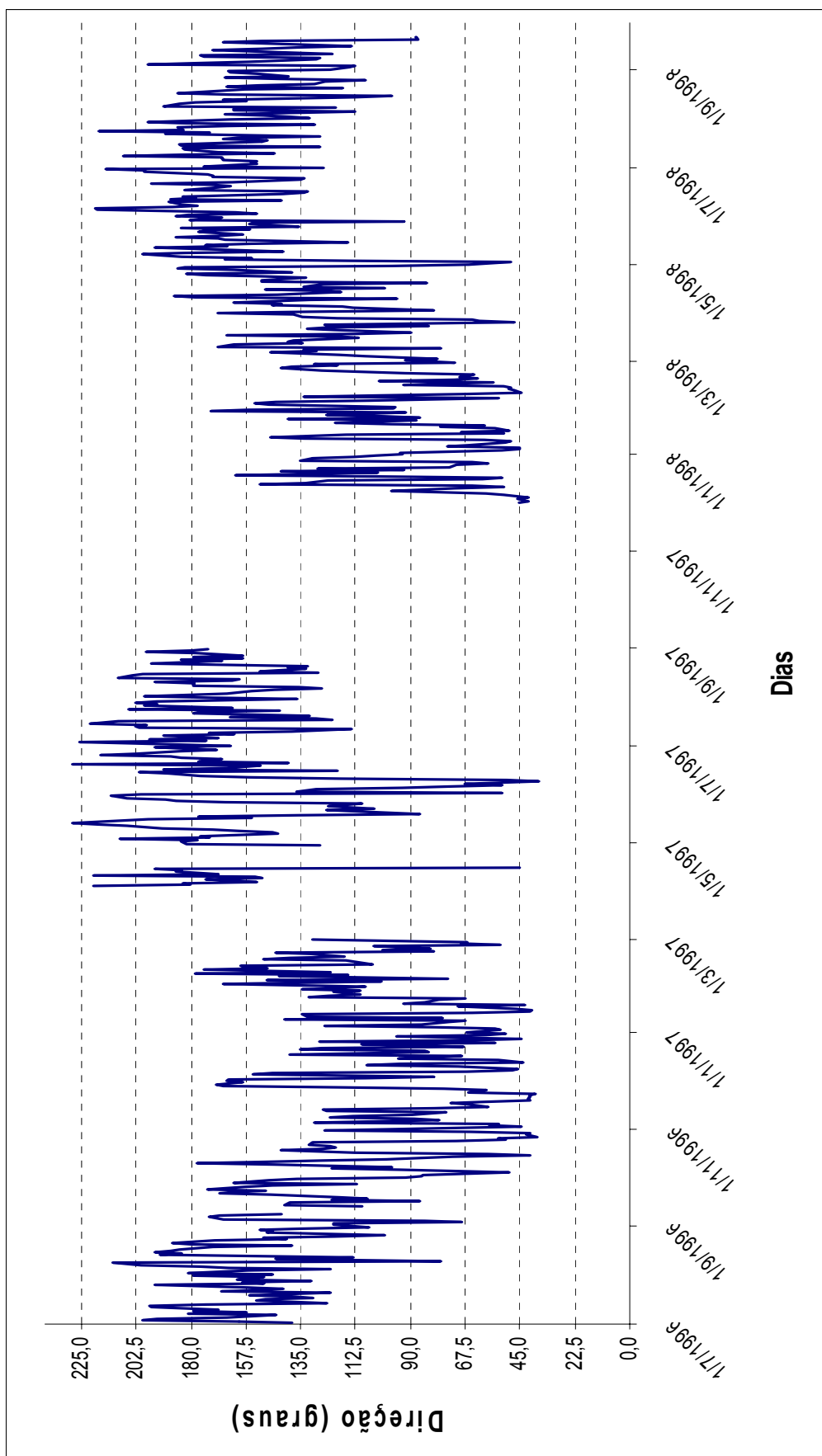


Figura 05 – Evolução da direção média do vento (graus) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998.

No verão verificamos que a direção do vento fica entre Leste e Nordeste, com alguns episódios de **SE**. Foi verificada uma mudança notável de dezembro para janeiro quando este passa a ser de sudeste, e retornando a direção Nordeste como é usualmente observado na estação de verão, devido a maior predominância dos ventos alísios como constatado por Santos et al. (2004), e Lyra (1998). Estes resultados concordam com outros estudos sobre a direção do vento, como em Silva et al. (2002) que afirmam que a predominância da direção do vento foi Sudeste.

É importante salientar que a direção do vento é bastante variável no tempo e no espaço, em função da situação geográfica local, da rugosidade da superfície, do relevo, da vegetação, do clima e da época do ano (VENDRAMINI, 1986).

4.1.3 – TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

Os efeitos moleculares, a rugosidade do solo e a instabilidade do ar provocam turbulência, que é responsável pela transferência dos efeitos friccionais para as camadas mais elevadas da atmosfera. Apesar de não possuir dados de alta frequência, a turbulência atmosférica foi acompanhada através do índice de turbulência (I_t) e do fator de rajadas (G).

4.1.3.1 – ÍNDICE DE TURBULÊNCIA (I_t)

A evolução da intensidade de turbulência (I_t) e da velocidade do vento é mostrada na Figura 06. Nele verificamos que o comportamento do I_t é inverso ao da velocidade do vento, ou seja, quando a velocidade do vento tende a aumentar, os valores de I_t diminuem. É sabido que I_t é calculado pela razão entre a velocidade instantânea e a velocidade média do vento. Portanto, a intensidade de turbulência está relacionada a variabilidade do vento e não a sua velocidade.

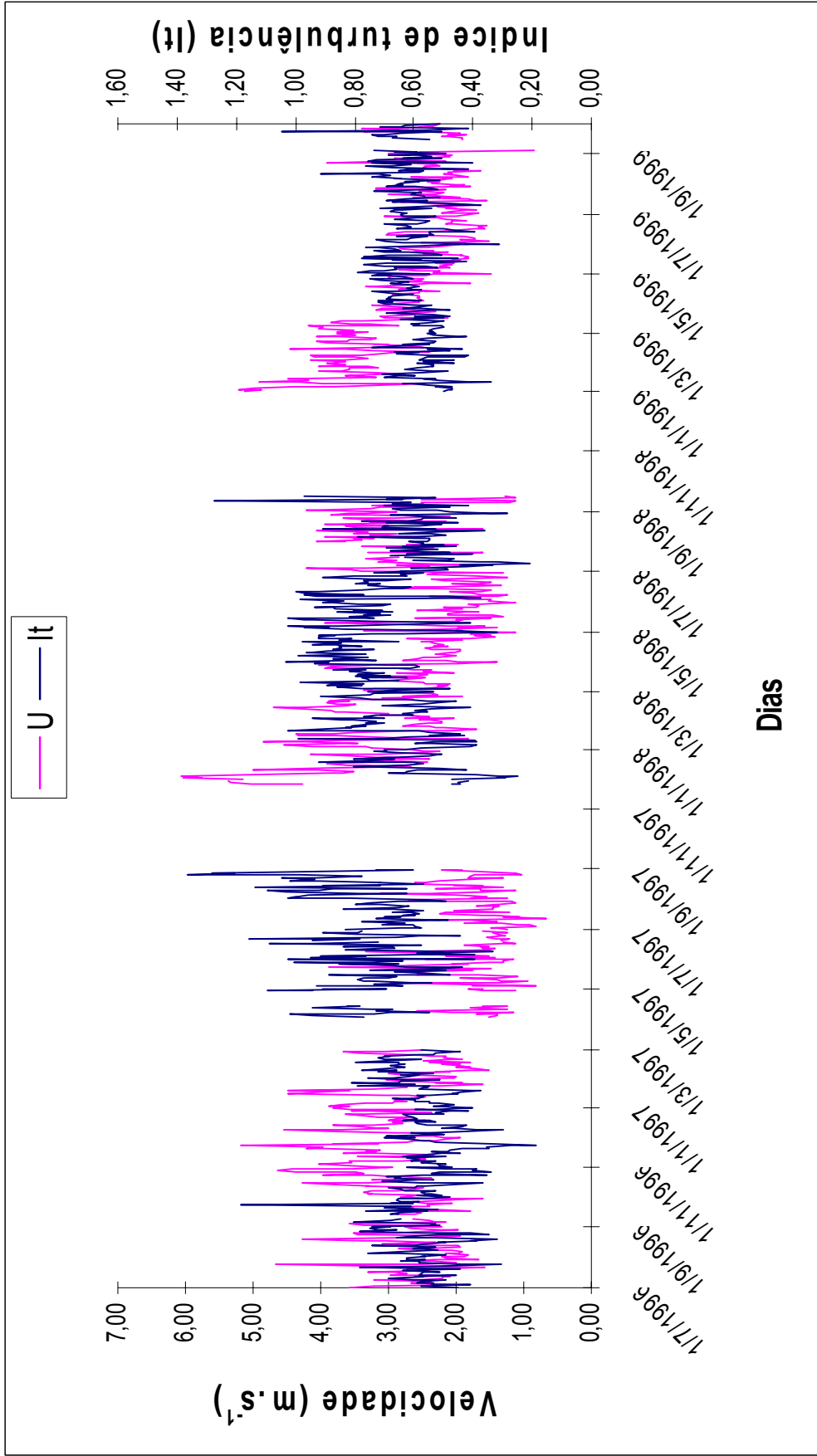


Figura 06 – Evolução da Intensidade de Turbulência para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999.

It é bem pronunciado no período de inverno de 1997 e meses de agosto e setembro de 1998, anos influenciados por eventos de grande escala (*El niño*).

Durante o *El Niño* são encontradas anomalias positivas da TSM, ou seja, nos meses de inverno a TSM estaria acima da média, o que dificultaria o deslocamento do ar do oceano para a superfície durante o dia.

Além da influência da TSM, Bernardo & Molion (2000), verificaram no inverno, que devido o deslocamento da Alta da Bolívia para NO do continente, ocorre uma intensificação no ramo descendente da célula Hadley-Walker, e com a aproximação do centro do ASAS, o gradiente de pressão horizontal e os ventos Alísios diminuem. Ao mesmo tempo, a intensidade da brisa do mar diminui, em função da redução do gradiente de temperatura continente-oceano, e a frequência de entradas das frentes frias na região aumenta, com ventos associados do quadrante **S**, e provocam uma redução na intensidade do vento médio.

O valor médio do índice de turbulência para todo o período foi 0,61, o valor máximo registrado foi no dia 26 de agosto de 1997 igual a 1,31, e o no dia 13 de julho de 1999 foi encontrado um valor mínimo de 0,0.

4.1.3.2 – FATOR DE RAJADAS (G)

O fator de rajadas (G) também apresenta um comportamento inverso ao da velocidade do vento, melhor visualizado no período de inverno de 1997 e meses de agosto de 1998 (Figura 07).

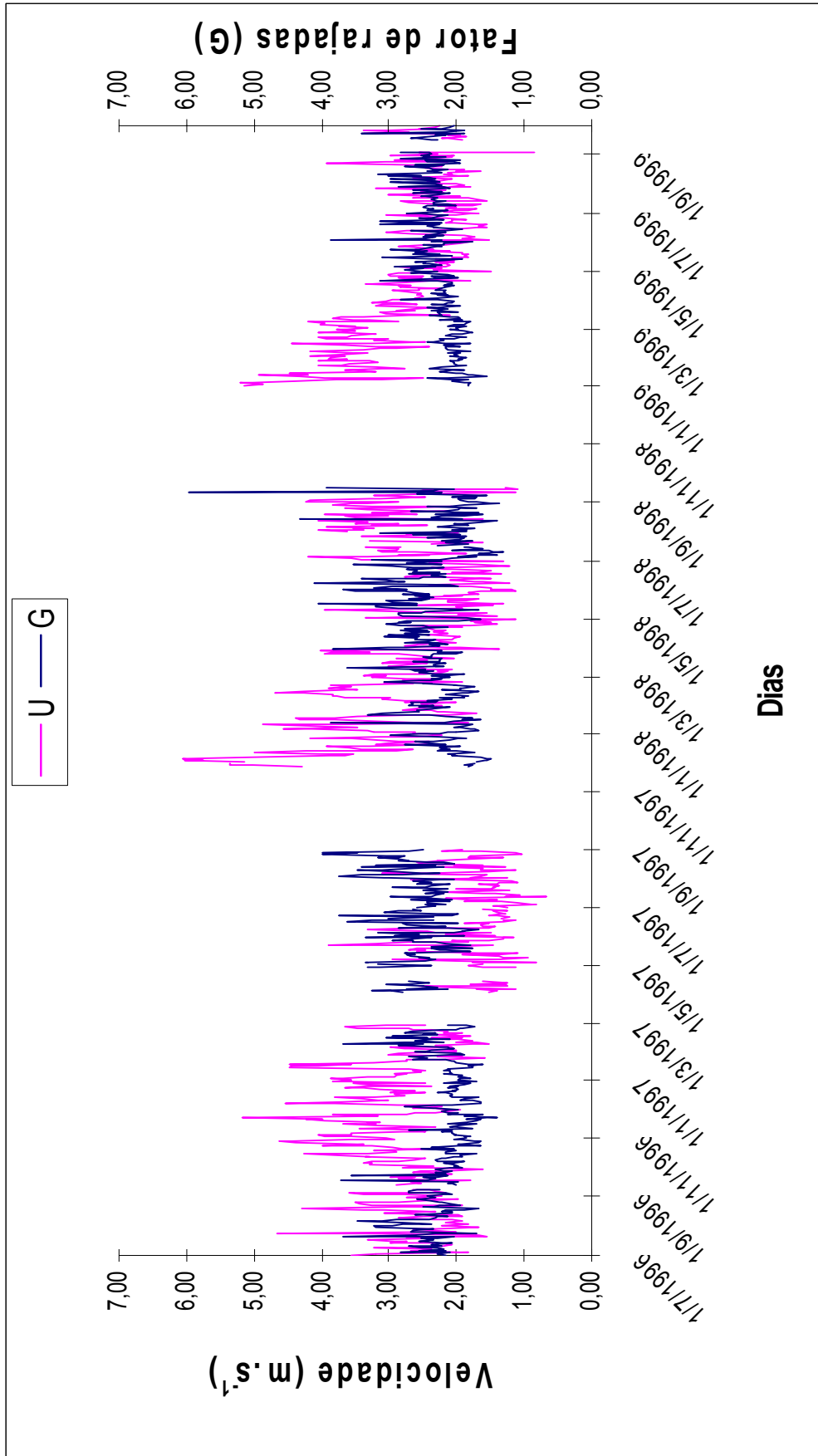


Figura 07 – Evolução do Fator de rajadas para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999.

Os valores de **G** para região em estudo são superiores aqueles aos encontrados por Fisch (1999) também em região costeira do Nordeste (Centro de Lançamento de Alcântara “CLA”). No referido estudo, o autor encontrou um **G** (a 10m) com o valor médio de 1,5. O fato de **G** ser menor em Alcântara é reflexo da influência da maior rugosidade. De acordo com Bergstrom et al., (1987), no interior do continente (1,5 km de distância da costa), os ventos são mais intensos. Segundo os autores, provavelmente isto se deve ao maior fluxo vertical da quantidade de movimento, consequência do aumento da turbulência. No nosso caso as medidas foram feitas aproximadamente 17 km da costa, portanto, é natural que a turbulência seja mais forte.

De acordo com Fisch (1999) quando encontramos ventos mais fortes, estes tendem a ser mais persistentes, e com isso pouca variação em tempo e espaço. A tendência é que ocorra uma diminuição na intensidade de turbulência e consequentemente uma diminuição no fator de rajadas. Vale salientar, que como mencionado no capítulo 02, em geral a rajada é acompanhada por uma variação igualmente brusca na direção, assim havendo pouca variação de **G** podemos dizer que houve pouca variação na direção do vento. No caso de Pilar – AL, este fato (pouca variabilidade da direção) foi verificado por Lyra (1998).

Dentre os quatros anos, em 1998 (meses de julho e agosto) foi observada uma maior variação em **G**, por conta dos baixos valores do vento encontrados nestes meses. Verificamos também que o comportamento sazonal de **G** é parecido com o de **It**.

Fica clara a influência dos fenômenos de grande escala quando observamos as diferenças que existem entre **U** e **G** em 1997 e 1998. Sendo que em 1997 a diferença entre eles é praticamente constante e em 1998 **G** tende a crescer e **U** a diminuir.

O valor médio do fator de rajadas para todo o período na região do Pilar – AL foi 2,34, o valor máximo encontrado foi no dia 11 de setembro de 1998 (5,96), e o valor mínimo de 1,32 no dia 09 de julho de 1998.

4.2 – CICLOS DIÁRIOS MÉDIOS MENSAIS: COMPARAÇÃO ENTRE INVERNO E VERÃO

Serão apresentados a seguir os ciclos médios mensais do vento e de turbulência. O fato da série ser incompleta impossibilita a análise dos ciclos anuais.

Para uma melhor visualização do comportamento do vento foi realizada uma análise sazonal das variáveis, entre as estações de inverno e verão. Os meses de verão foram: janeiro e fevereiro/97, janeiro e fevereiro/98 e janeiro e fevereiro/99. No caso da direção não foi possível utilizar dados de 99 por falhas na série de dados já mencionada na metodologia. Os meses de inverno são: julho e agosto de 96, 97, 98 e 99.

4.2.1 – VELOCIDADE DO VENTO

Fica nítido que a velocidade do vento (Figura 08-A e 08-B) é maior nos meses mais quentes, justamente por conta, do aquecimento da superfície terrestre e com isso aumentando a diferença de temperatura entre oceano e a terra. Por conta disto podemos dizer que o ciclo do vento acompanha o ciclo de insolação (temperatura).

Durante o período diurno verificou-se que na estação de verão foram registrados ventos máximos de aproximadamente $7,0 \text{ m.s}^{-1}$, e que o horário de pico da velocidade do vento muda de acordo com as estações do ano, ou seja, fica evidente a variação sazonal da velocidade do vento. Durante os meses de inverno (junho/julho/agosto) encontramos valores mais baixos de **U**, enquanto que nos meses de primavera (setembro/outubro/novembro) a velocidade do vento torna a crescer atingindo sua velocidade mais alta e nos meses de verão (dezembro/janeiro/fevereiro) os valores começam a diminuir, apresentando o mesmo comportamento durante os meses de março/abril/maio atingindo um valor mínimo no inverno.

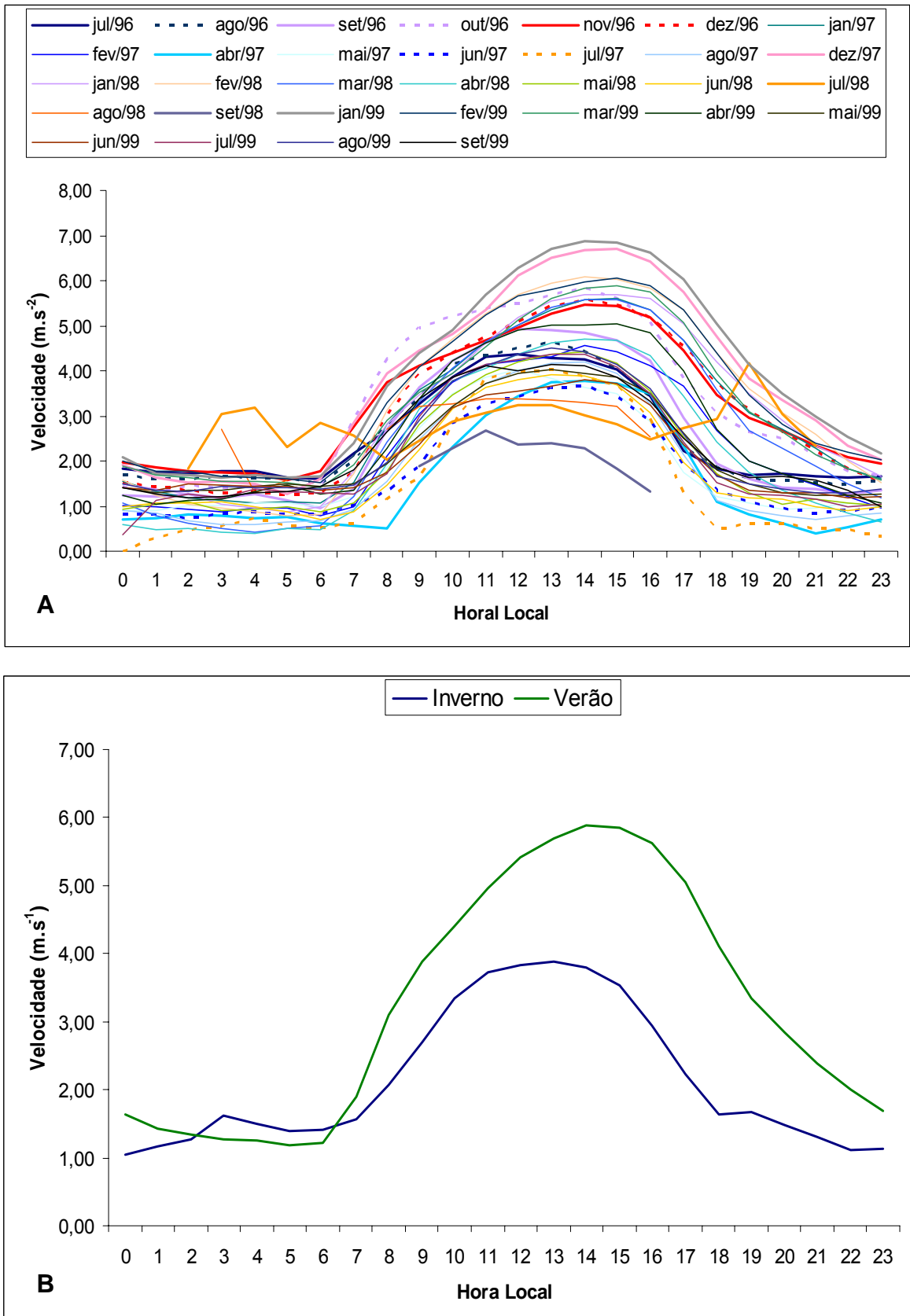


Figura 08 – (A) Ciclo horário da Velocidade média do Vento ($m.s^{-1}$) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999; **(B)** Ciclo horário da Velocidade média do Vento ($m.s^{-1}$) entre inverno e verão.

No início da manhã é comum haver um aumento brusco da velocidade do vento entre 07h e 08h, mas isto não acontece com os meses de abril de 1997 e julho de 1998 (de 0,61 à 0,52 m.s⁻¹ e de 2,58 à 2,02 m.s⁻¹, respectivamente). Julho de 1998 apresenta um comportamento diferenciado dos demais por apresentar, no período noturno, os maiores valores da velocidade do vento.

Durante o período noturno, assim como no período diurno, existe uma boa distinção entre os anos (Figura 08-A). Sendo observado que as menores velocidades horárias do vento foram encontradas no ano de 1998 (transição de *El Niño* para *La Nina*).

No período noturno os valores do vento geralmente não ultrapassam a velocidade de 2,0 m.s⁻¹ por conta da ação dos alísios sobre a brisa terrestre. Quando ocorre o processo de Brisa marítima o ar desloca-se do oceano para o continente devido à baixa pressão que se forma sobre a superfície, esse fenômeno associado aos ventos alísios intensifica a velocidade do vento. No período da noite ocorre o inverso, o deslocamento do ar se dá do continente para o oceano. Como os ventos alísios continuam a soprar no sentido oceano-continente isto acaba diminuindo a intensidade de brisa terrestre. Verificamos que neste horário o ano de 1998 apresenta os menores valores encontrados, enquanto que em 1999 os ventos são mais fortes. Os anos de 1996 e 1997 são anos intermediários.

No período diurno os anos de 1996 e 1999 foram os que apresentaram velocidades do vento mais fortes, enquanto que em 1997 (1,80 m.s⁻¹) foi um ano intermediário. Também foi observado que em 1996 o valor máximo do vento (4,37 m.s⁻¹) foi atingido as 12h, assim com em 1999 (4,37 m.s⁻¹); enquanto que 1997 (4,02 m.s⁻¹) e 1998 (2,46 m.s⁻¹) foi atingido as 13h.

Durante a estação de inverno o comportamento do vento durante estes fenômenos varia muito, assim como na suas fases de transição. Em períodos de *La Niña* os valores do vento tendem a ser mais altos que em períodos de *El Niño*. Em fases de transição de *La Niña* para *El Niño* os valores da velocidade do vento também são mais altos, do que quando acontece o contrário.

Foi feita uma verificação da diferença sazonal através das médias horárias de todo o período estudado (Figura 08-B). Fica nítido que durante os meses de verão a velocidade do vento é bem maior que durante o inverno durante todo o período, exceto no horário da madrugada entre 02 e 06h. Além da diferença em termos de valores é interessante notar que os padrões são bem diferentes, o ciclo de inverno é

praticamente simétrico. No ciclo de verão não se verifica simetria e a curva foge um pouco do padrão normalmente apresentado por ciclos diurnos de variáveis meteorológicas. Também é observado que **U** apresenta um aumento entre 18 e 19h, tornando a diminuir a noite.

O horário de pico entre as estações também muda ao longo dos meses, sendo que no inverno acontece às 13h e no verão às 14h.

A velocidade média horária para todo o período foi $2,53 \text{ m.s}^{-1}$, o valor máximo registrado foi no mês de janeiro de 1999 quando o vento atingiu uma velocidade de $6,88 \text{ m.s}^{-1}$, e o valor mínimo de $0,32 \text{ m.s}^{-1}$ em julho de 1997.

4.2.2 – DIREÇÃO DO VENTO

Os ciclos médios mensais da direção do vento para todo o período do experimento na região do Pilar-AL, podem ser observado na Figura 09-A, e a média entre as estações de inverno e verão na Figura 09-B. Como já mencionado anteriormente, o ano de 1999 não apresenta dados de direção do vento. Percebemos que durante os três anos a direção varia mais no período noturno. Ao comparar as estações observa-se quão diferente é o sentido do vento (Figura 09-B).

Verificamos que a direção do vento durante o dia origina-se do oceano, enquanto que a noite o sentido passa a ser de continente. Nos meses de inverno o vento tem sentido **S/SW** no período noturno e no período diurno sentido **SE**. Nos meses de verão durante o dia o vento tem sentido **NE-L**, e a noite sentido **SE-S**.

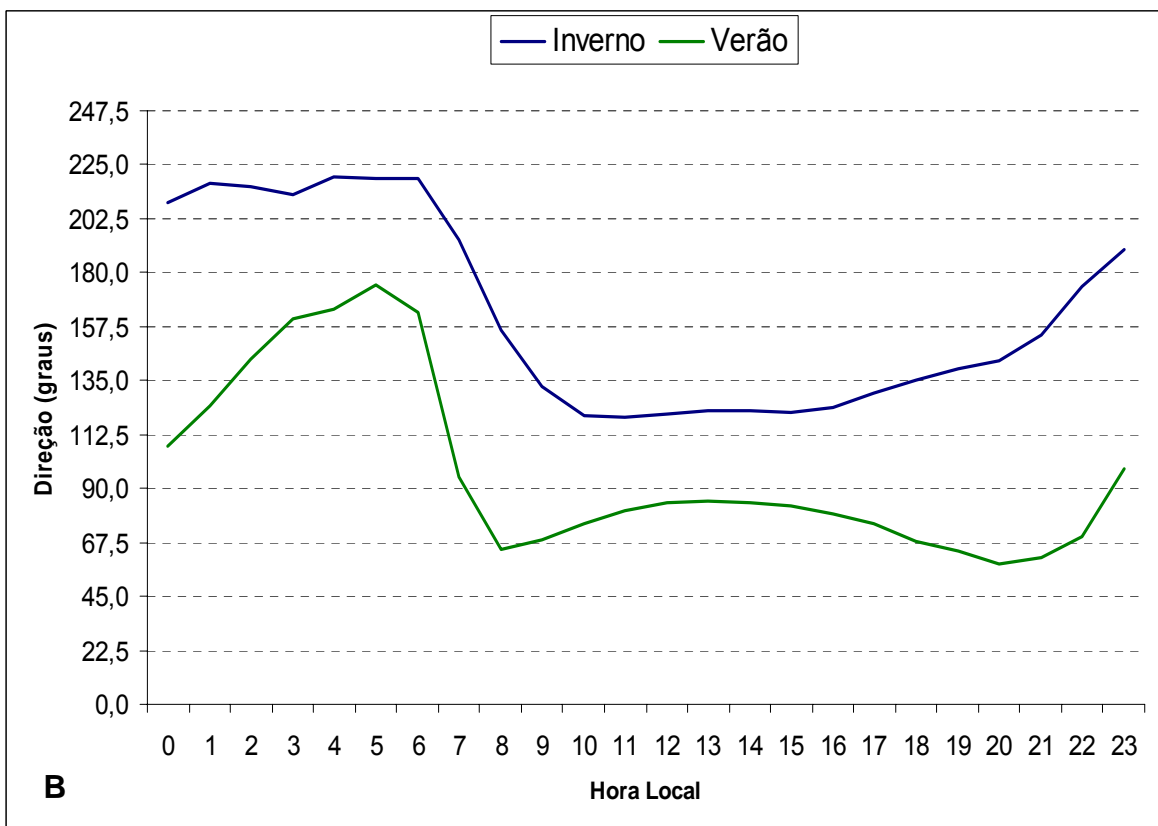
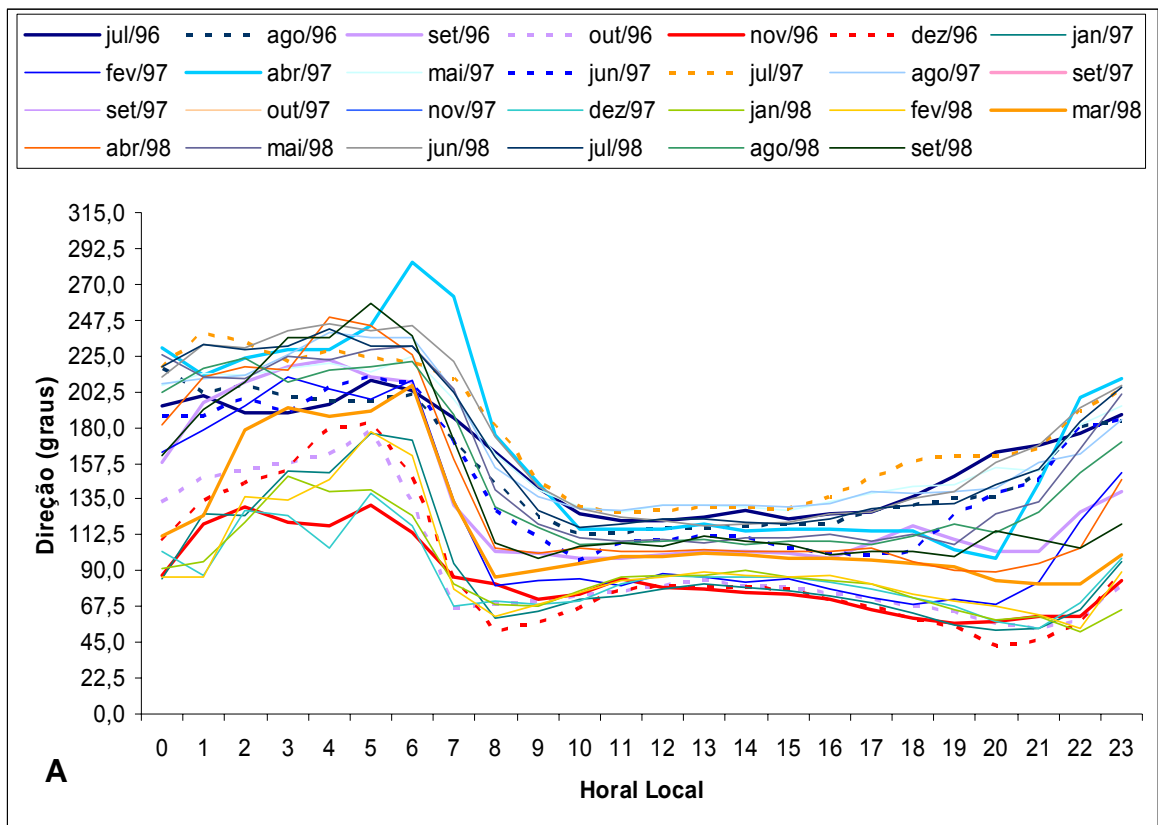


Figura 09 – (A) Ciclo horário da direção do Vento (graus) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998; (B) Ciclo horário da direção do Vento (graus) entre inverno e verão.

A mudança da direção do vento no horário da manhã começa a partir do nascer do sol, por causa do gradiente de pressão entre as superfícies do continente e oceano, causado pela absorção de energia solar. À noite verificamos que a mudança do vento ocorre às 21h.

O sentido do vento é bem diferenciado de um período ao outro, por causa da atuação das brisas, enquanto que a diferenciação sazonal ocorre por conta da localização da ASAS, pois de acordo com Holanda (2003), os ventos na costa do nordeste são de Leste-Nordeste no início do ano e de Sudeste durante o período de abril a junho. Além da influência dos ventos alísios durante todo ano.

4.2.3 – TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

4.2.3.1 – ÍNDICE DE TURBULÊNCIA (I_t)

O ciclo médio de I_t e G demonstram que quanto o vento varia numa determinada região (Figura 10-A e 10-B e Figura 11-A e 12-B, respectivamente). Assim como verificado no ciclo da velocidade do vento (figura 08), também existe uma diferenciação deste comportamento entre as estações.

O comportamento de I_t , como já mencionado, é inverso ao da velocidade do vento. Portanto é de se esperar que nos meses mais quentes este seja menor em relação aos meses mais frios. E durante o ciclo horário seus maiores valores são encontrados no horário da noite, como também as diferenças de um ano ao outro.

Na figura 10-A percebe-se que as maiores variações de I_t ocorreram à noite. Os meses de inverno de 1997 se destacam dos demais, apresentando valores bem mais altos à noite, mas durante o dia seu comportamento é similar aos demais.

No inverno as linhas do índice de turbulência encontram-se bem mais espaçadas entre os anos, tanto durante o dia como a noite, com destaque para o período noturno de 1997 e 1998 (Figura 10-A), que apresenta os valores mais altos. Os anos de 1996 e 1999 apresentam comportamento semelhante em todo o horário analisado.

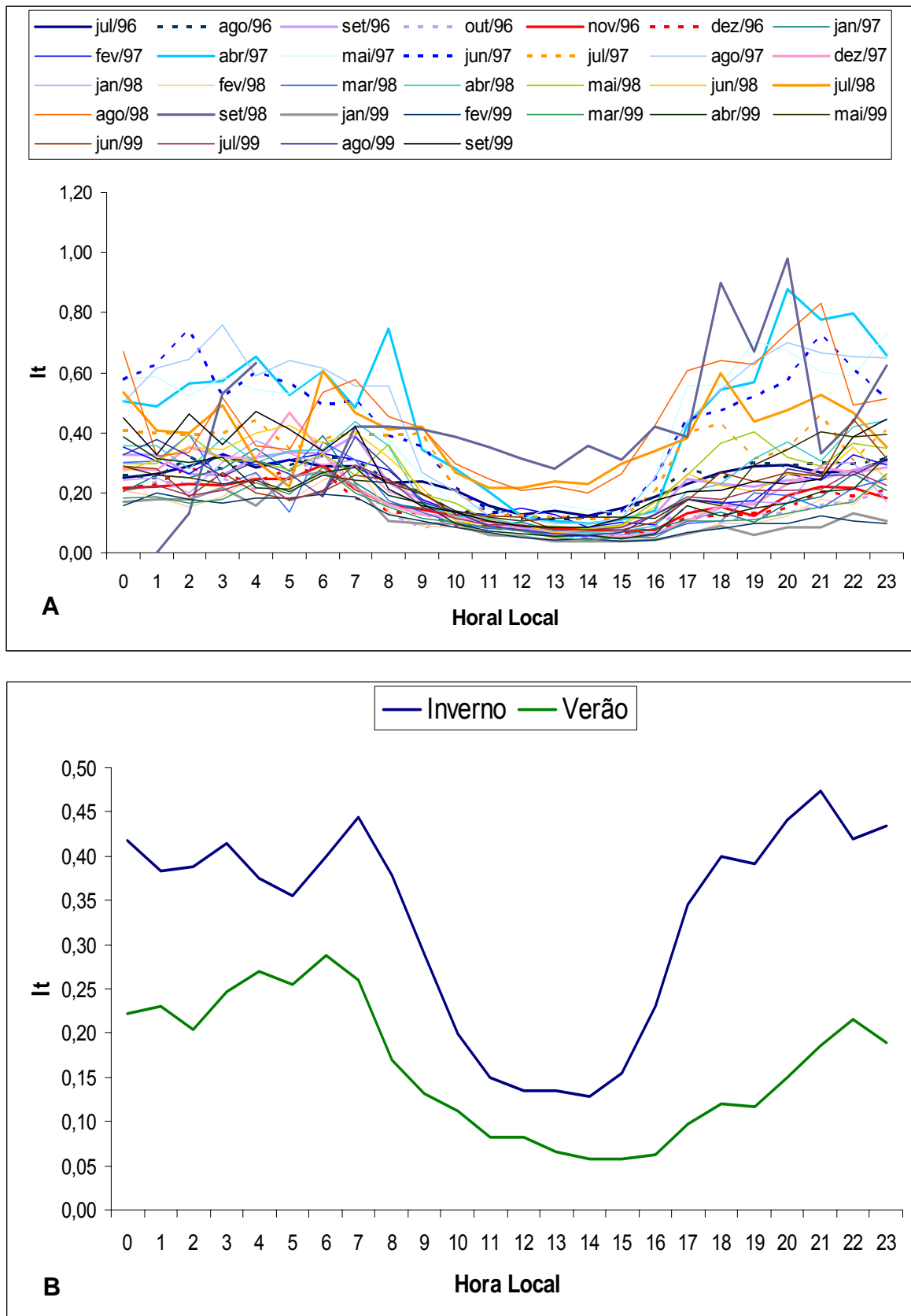


Figura 10 – (A) Ciclo horário do Índice de Turbulência (It) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999; (B) Ciclo horário do Índice de Turbulência (It).

Os meses de julho/agosto/setembro de 1998 apresenta valores altos durante o dia, quando nos demais acontece o contrário, porque neste período a velocidade do vento é mais baixa, como já apresentando anteriormente, e no período noturno demonstra uma maior oscilação entre valores máximos e mínimos.

Na figura 10-B são mostrados os ciclos médios do inverno e do verão, e como era de se esperar os meses de inverno apresentam os maiores valores por conta de nesta estação os ventos serem menores e com menor variabilidade, como foi verificado no item 4.1.3.1. Durante o dia a diferença entre inverno e verão é bem menor que no período noturno, porque no inverno a atuação da brisa terrestre em direção oposta aos alísios é bem mais significativa que na estação de verão, e com isso a variabilidade do vento é menor.

O valor médio horário para o I_t durante todo o período de estudo foi 0,25, enquanto que a máxima ocorreu às 20h no mês de setembro com um valor 0,98. O valor mínimo foi de 0,0 as 02h também no mês de setembro.

4.2.3.2 – FATOR DE RAJADAS (G)

Na figura 11-A e B são mostrados os ciclos médios mensais de G durante todo o experimento, e observamos que é apresentado um comportamento semelhante ao de I_t . Verificamos que os valores de G são maiores quando a velocidade do vento é menor, e com isso uma distinta diferença entre os meses de inverno e verão.

Nos meses de inverno (Figura 11-A) também se verifica diferenças significativas entre os ciclos, principalmente no horário noturno, quando em 1997 obteve-se valores máximos, e em setembro de 1998 valores mínimos, entre 01 e 6h. Na figura 11-A o comportamento de G no ano de 1997 se destaca, tendo em vista os altos valores noturnos nos meses de inverno. Em 1998, observamos que o mês de setembro apresenta uma configuração diferente dos demais, ou seja, valores muito baixos no horário noturno, e valores altos no horário de insolação.

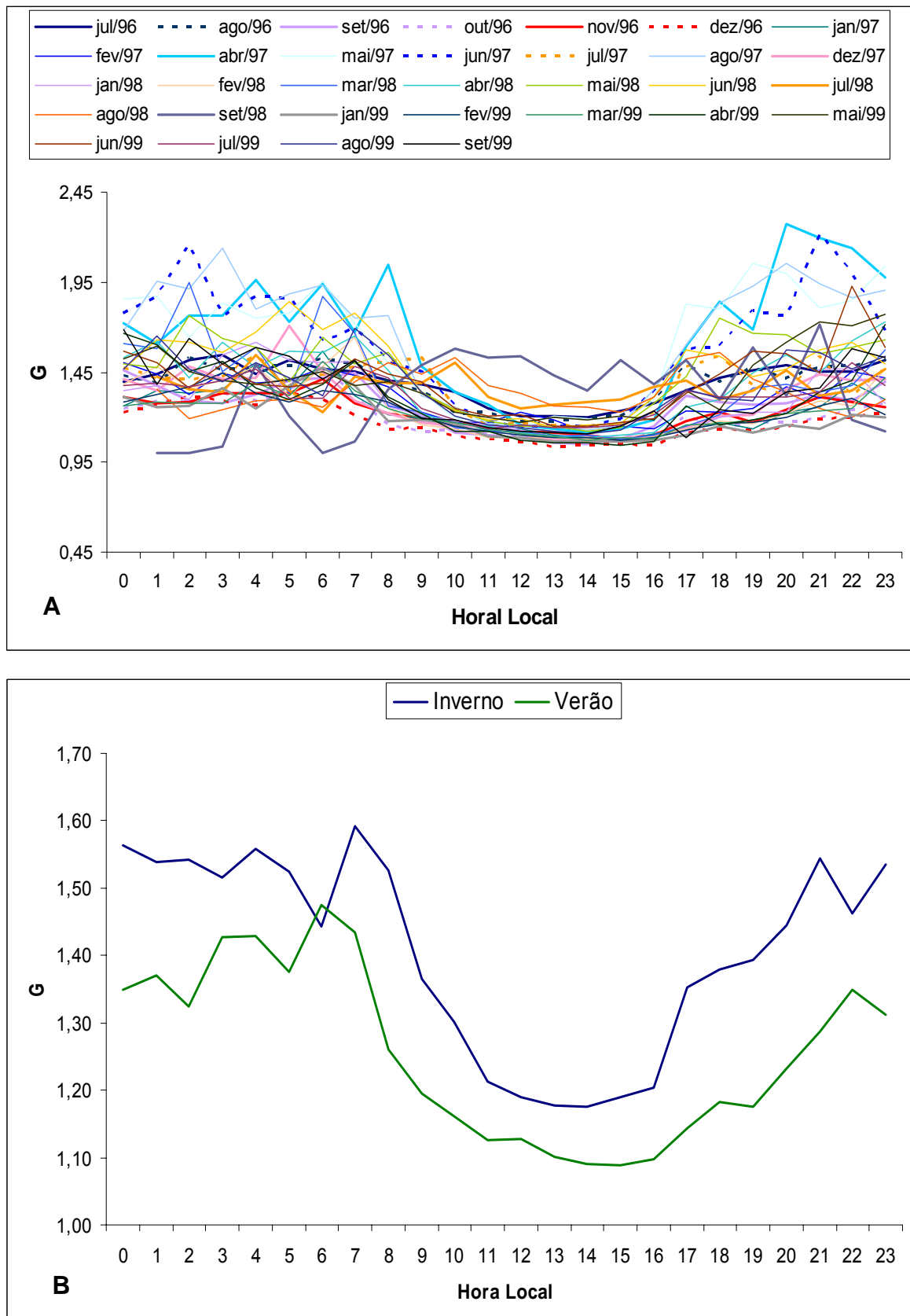


Figura 11 – (A) Ciclo horário do Fator de Rajadas (G) para a região do Pilar nos anos de 1996/1997/1998/1999; **(B)** Ciclo horário do Fator de Rajadas (G) entre inverno e verão.

Na comparação entre os ciclos médios de inverno e verão (Figura 11-B) verificamos que o comportamento nas duas estações é bem parecido sendo que os maiores valores são encontrados nos meses de inverno, devido aos baixos valores da velocidade do vento. Percebe-se que os valores de **G** são próximos durante o dia e vão se afastando no horário noturno, em função da mudança de direção que acontece nestes períodos.

Nos meses de verão verificamos que os valores de **G** vão aumentando a partir das 22h até atingir um valor máximo às 06h, enquanto que no inverno ele diminui até atingir o mínimo. Esta inversão de tendência é ocasionada pela mudança de direção do vento às 22h (ver figura 09-B). Podemos dizer que o início do processo de brisas na região começa neste horário. Uma vez começando a brisa há uma diminuição na velocidade do vento, e conseqüente aumento da turbulência atmosférica.

O valor médio horário encontrado para o fator de rajadas foi 1,36, o valor máximo foi 2,28 às 20h no mês de abril de 1997, e o valor mínimo encontrado foi 1,00, mas este valor se repete em três horários diferentes, primeiramente às 01 e 02h, e às 06h ambos no mês de setembro de 1998.

4.3 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO VENTO E A TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

Para ter uma melhor visão da relação entre a velocidade do vento e a turbulência foram confrontados os dados de **It** e **U**.

No confronto **It** x **U** (Figura 12) notamos que os valores acima de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, são os que melhor correlacionam, mas mesmo assim ainda apresentam alguns valores dispersos. Geralmente, os pontos dispersos representam índices de turbulência inferiores a 0,4.

Os valores de **G** confrontados com os valores de **U** (Figura 13) mostraram uma relação inversa entre eles. Quando os valores do vento estão abaixo de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$, há uma dispersão entre os valores, e um aumento de **G**.

É importante lembrar que tanto **It** como **G** estão ligados a variabilidade do vento. Portanto, quando o vento é muito fraco, qualquer aumento, mesmo que esporádico, representa um aumento muito grande da turbulência.

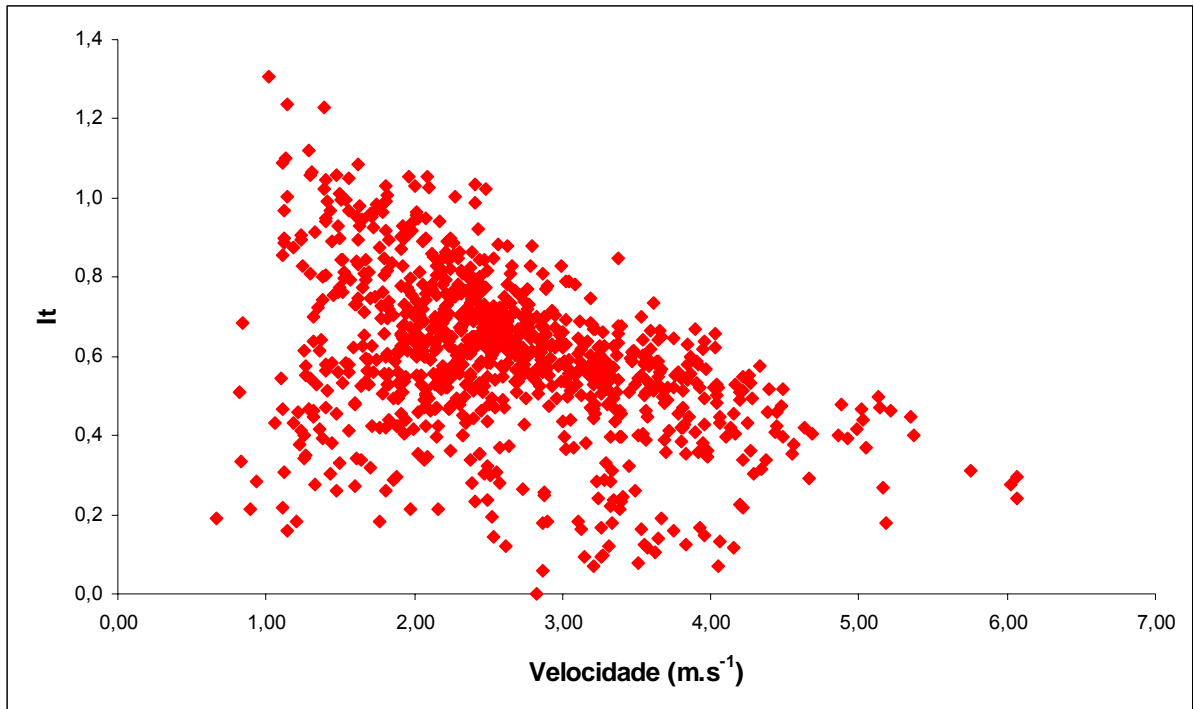


Figura 12 – Velocidade média do vento (m.s⁻¹) versus Índice de Turbulência (It) no período de Julho de 1996 à Setembro de 1999.

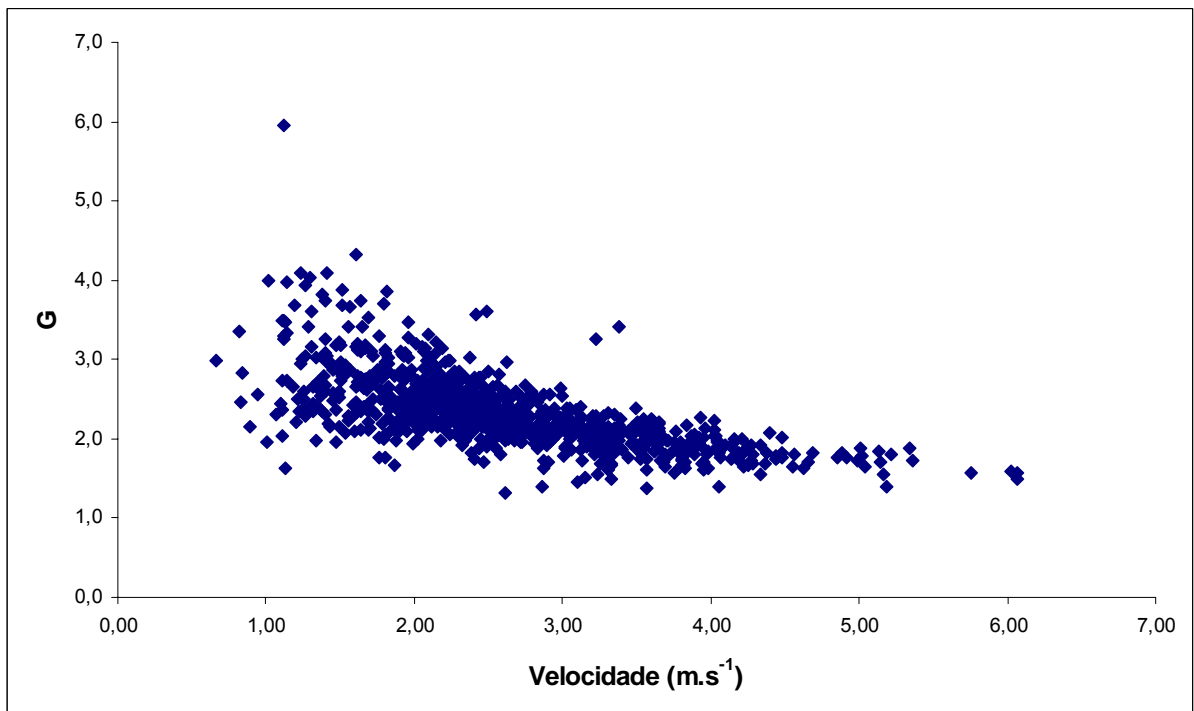


Figura 13 – Velocidade média do vento (m.s⁻¹) versus Fator de rajadas (G) no período de Julho de 1996 à Setembro de 1999.

4.4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO VENTO

Serão discutidos a seguir os resultados da análise estatística dos dados de vento (velocidade e direção). No caso da direção do vento, existe uma falha na série de dados.

A estatística foi feita a partir dos dados registrados: média a cada dez minutos (01 de julho de 1996 a 08 de setembro de 1996) e a cada 6 minutos (13 de setembro de 1996 a 21 de setembro de 1999).

4.4.1 – VELOCIDADE DO VENTO

Na figura 14 observamos a frequência média da velocidade do vento para todo o período em estudo (julho de 1996 a setembro de 1999) na região do Pilar - AL.

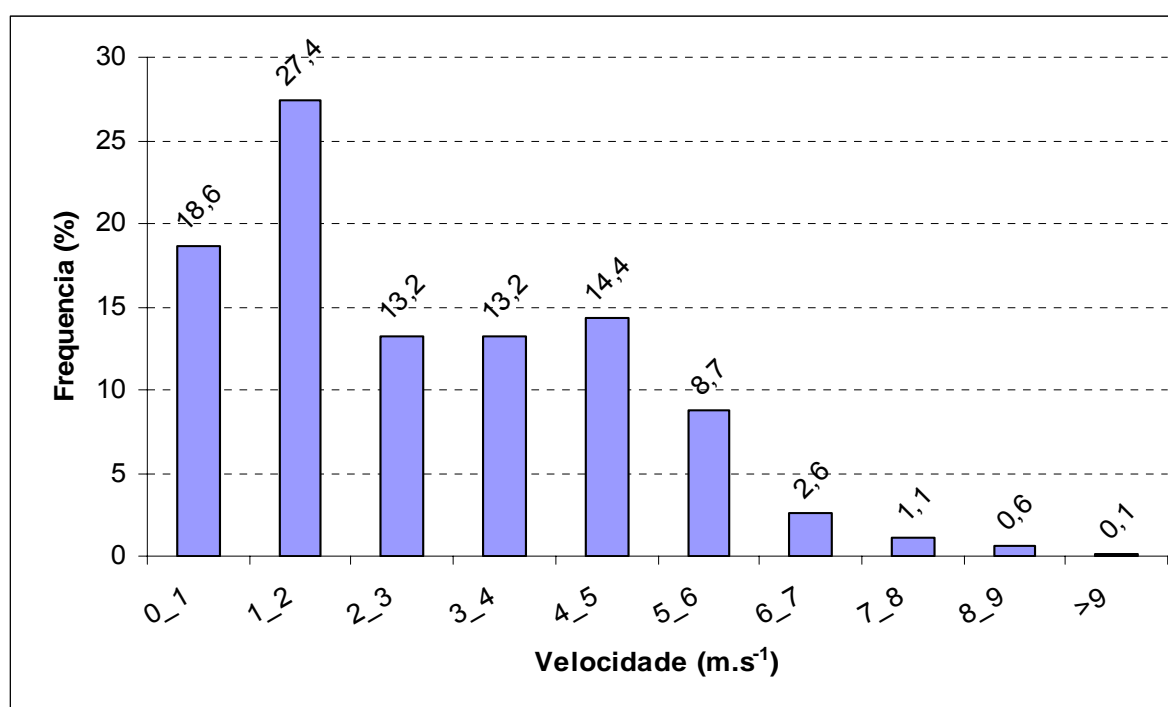


Figura 14 – Distribuição da frequência para intervalos da velocidade do vento (m.s⁻¹) no período de julho de 1996 a setembro de 1999.

Os ventos na faixa de 1,0 a 2,0 m.s⁻¹, são os mais frequentes (28%), seguido de ventos entre 0 e 1,0 m.s⁻¹ (18%). Portanto, quase a metade (46%) dos casos são ventos na faixa de zero até 2,0 m.s⁻¹. Nas três classes posteriores (2-3, 3-4, e 4-5 m.s⁻¹) os percentuais são muito próximos (entre 13 e 14%).

Finalmente, podemos afirmar que os ventos são, na sua maioria, fracos. Na faixa $0-3 \text{ m.s}^{-1}$ ficam concentrados 59,3% dos casos e acima de 5 m.s^{-1} apenas 13,16%.

Apesar das falhas na série de dados, serão confrontados a seguir as distribuições de freqüência de cada um dos quatros anos (Figura 15).

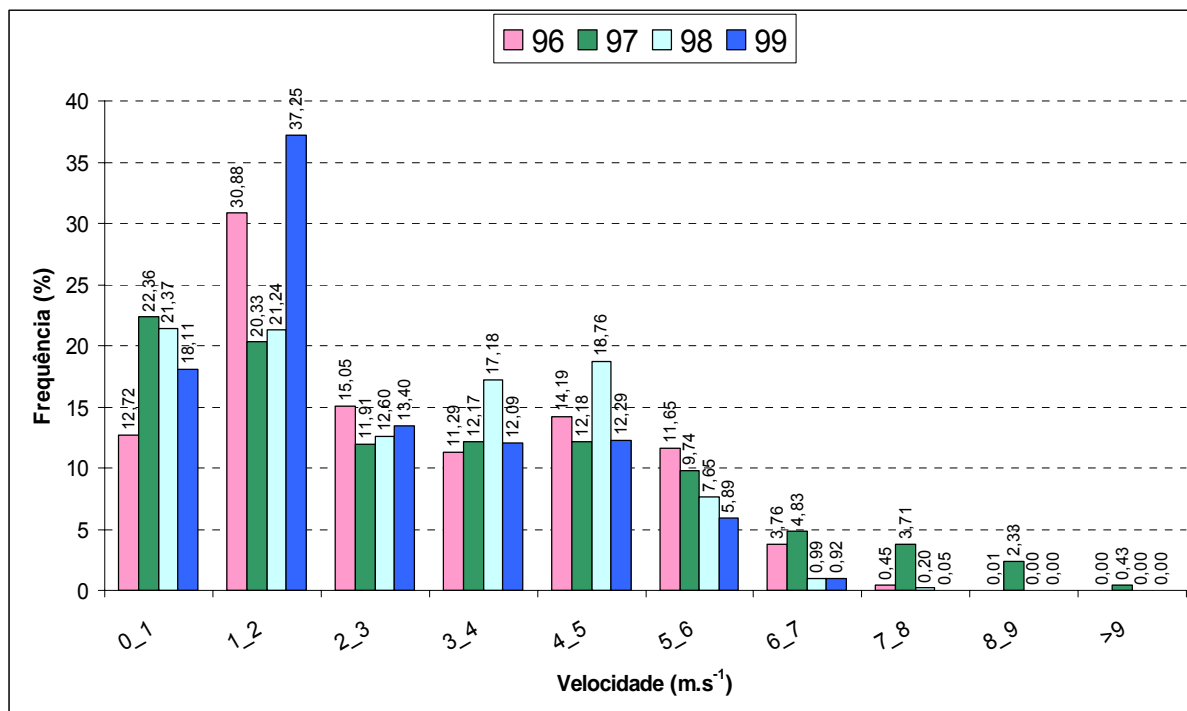


Figura 15 – Distribuição da freqüência para intervalos da velocidade do vento (m.s^{-1}) no período de julho de 1996 a setembro de 1999.

Em 1996, a maioria dos ventos (30,88%) se situaram na faixa $1-2 \text{ m.s}^{-1}$. No ano seguinte a maioria dos casos ficou entre $0-1 \text{ m.s}^{-1}$. No entanto, somente neste ano ocorreram ventos nas faixas $8-9$ e $9-10 \text{ m.s}^{-1}$. No ano de 1998 a maioria absoluta (21,37%) dos casos ficou na faixa de $0-1 \text{ m.s}^{-1}$. Em 1999 a distribuição é parecida com 1996 sendo que as freqüências nas faixas $0-1$ e $1-2$ são superiores.

Finalmente, podemos concluir que o *El Niño* influenciou em ventos mais fortes e com maiores picos.

4.4.2 – DIREÇÃO DO VENTO

A estatística sobre a direção predominante do vento na região foi feita apenas para os três anos de estudo pela ausência de dados (1999), como pode ser observado na figura 16.

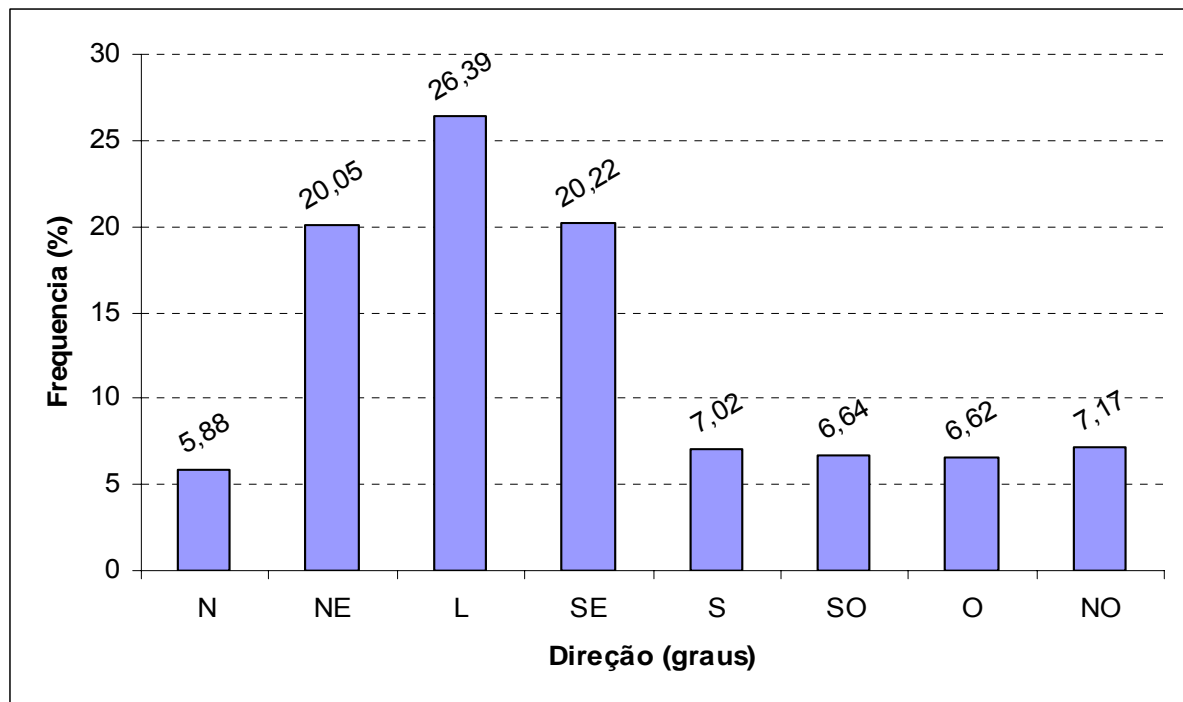


Figura 16 – Distribuição da frequência para intervalos da direção do vento ($m.s^{-1}$) no período de julho de 1996 a setembro de 1998.

A direção predominante do vento é **L**, com aproximadamente 26% dos casos. Seguido das direções **NE** e **SE**, ambos com 20%, ou seja, a soma de **NE**, **L** e **SE** (sentido oceano-continente) representa 66,67% dos casos. Resultado esperado uma vez que nesta região os ventos são regidos pelo sistema de grande escala (os ventos alísios). Conforme já constatado este resultado coincide com Silva et al. (2004).

Os ventos no sentido continente-oceano (**N**, **NO**, **O**) são pouco freqüente, com 26,29% dos casos. Sendo observado a influência de brisas terrestres, que predomina nos meses de inverno como constatado por Rocha (1999).

Uma comparação entre os três anos (1996/1997/1998) é mostrada na figura 17. Como foi verificado na média em todo período observado a direção do vento acontece com maior frequência nas direções **NE**, **L** e **SE**. Em concordância com Barreto et al. (2002) que afirmam que a direção predominante acontece de **L-NE** para todo estado de Alagoas.

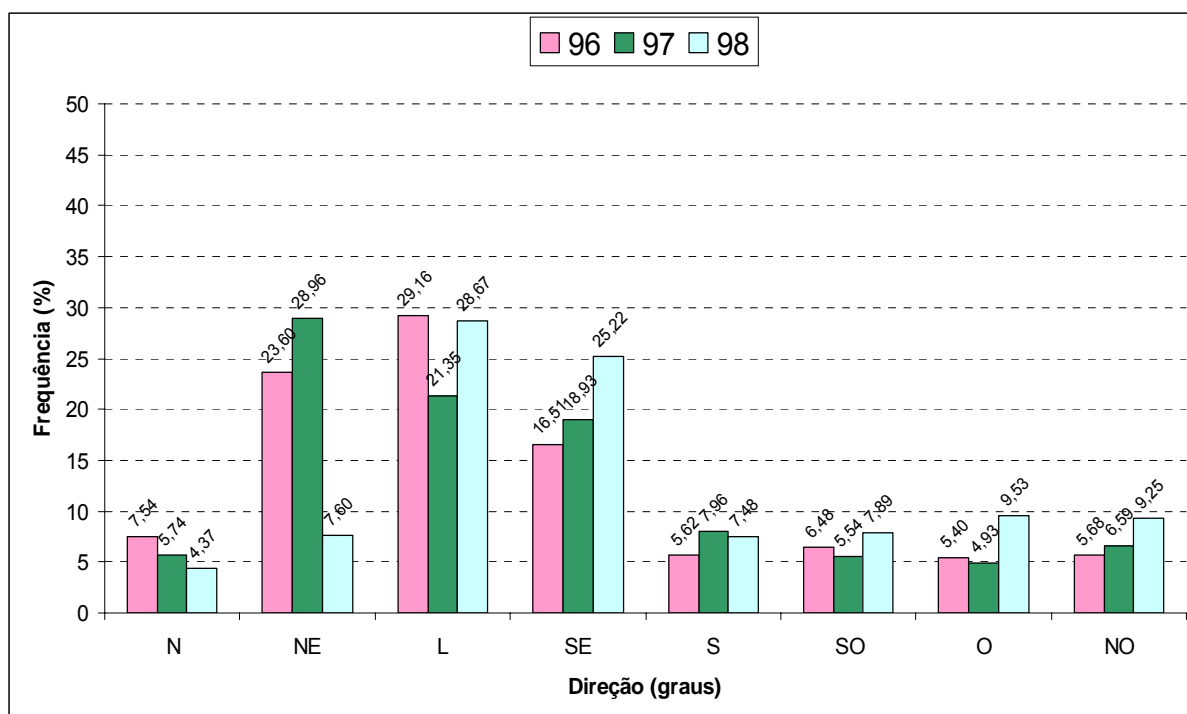


Figura 17 – Distribuição da freqüência para intervalos da direção do vento (graus) no período de julho de 1996 a setembro de 1998.

Apesar da ausência de dados em 1999 e das demais falhas na série de dados uma coisa fica evidente: influência do *El niño*. Além de provocar uma aceleração no fluxo regional, este fenômeno também provoca mudança na sua direção. A evidência disso é o fato de, somente em 1997, a direção predominante ser **NE** (28,96% dos casos). Um outro fato curioso é a pouca concentração de eventos de **NE** e aumento dos de **SE** no ano de 1998 (transição *El niño* – *La niña*).

4.5 – ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO

A partir dos valores da velocidade do vento estimados para 75m de altura foi calculado o potencial eólico.

Estes cálculos revelaram que o potencial eólico na região apresenta valores entre 0 e 1054,12 W.m⁻². No ano de 1996 encontramos no meses de outubro e dezembro os maiores valores médios (396,26 W.m⁻² e 401,99 W.m⁻², respectivamente).

O ano de 1997 apresenta no inverno baixos valores, tanto da velocidade do vento quanto do potencial eólico, por causa do fenômeno *El Niño*, como já

mencionado no decorrer do estudo. No verão ocorre o contrário, por exemplo, no mês de janeiro o valor médio foi de 165,72 W.m⁻².

Os valores médios mensais estão agrupados na tabela 2. Verificamos que, de todo o conjunto de dados disponível, o mínimo ocorre em setembro de 1998 (35,60 W.m⁻²) e o máximo em dezembro de 1996 (401,99 W.m⁻²). A média geral foi de 110,27 W.m⁻².

TABELA 03 – Média mensal do Potencial eólico (W.m⁻²) durante os anos de 1996/1997/1998/1999, para a região do Pilar-AL.

	1996	1997	1998	1999
JANEIRO	-	165,72	151,57	146,40
FEVEREIRO	-	95,78	161,35	125,27
MARÇO	-	-	122,70	118,62
ABRIL	-	57,01	85,53	70,42
MAIO	-	42,00	87,14	73,48
JUNHO	-	41,02	76,08	87,64
JULHO	65,00	49,82	98,54	84,70
AGOSTO	76,89	52,42	46,28	84,70
SETEMBRO	71,52	-	35,60	55,74
OUTUBRO	396,26	-	-	-
NOVEMBRO	169,35	297,39	-	-
DEZEMBRO	401,99	44,23	-	-

4.5.1 – ESTIMATIVA HORÁRIA DO POTENCIAL EÓLICO: COMPARAÇÃO ENTRE INVERNO E VERÃO

Na figura 18 é mostrado o ciclo diário do potencial eólico para todo o período estudado (valores estimados para o vento a 75m). Fica claro a variação sazonal, sendo encontrado nos meses de verão os valores mais altos e nos meses de inverno os mais baixos. O comportamento horário é similar ao da velocidade do vento, ou seja, ocorre o aumento do potencial eólico até atingir o máximo e depois os valores tornam a diminuir. Por causa da variação sazonal os horários de pico também são diferentes.

O mês de setembro de 1996 se destaca em relação aos demais por apresentar os maiores valores durante o período diurno, enquanto que o mês de novembro de 1997 se destacou por apresenta os maiores valores a partir das 17h permanecendo assim durante o período noturno.

A média horária alcançada pelo potencial eólico durante todo o período foi de $136,21 \pm 128,17 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto que o máximo foi de $1017,71 \text{ W.m}^{-2}$ no mês de setembro de 1996 às 13h e o mínimo de $0,86 \text{ W.m}^{-2}$, no mês de abril de 1997.

Na figura 18-B constatamos que existe uma grande diferença entre as médias do inverno e do verão durante todo o período diurno ($74,19 \pm 81,55 \text{ W.m}^{-2}$, e $198,42 \pm 186,19 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente). Na estação de verão, durante o período noturno, o potencial tende a diminuir a partir das 22h, atingindo valores próximos ao da estação de inverno, isto pode ser explicado pelo processo de brisas sobre a velocidade do vento como já mencionado anteriormente.

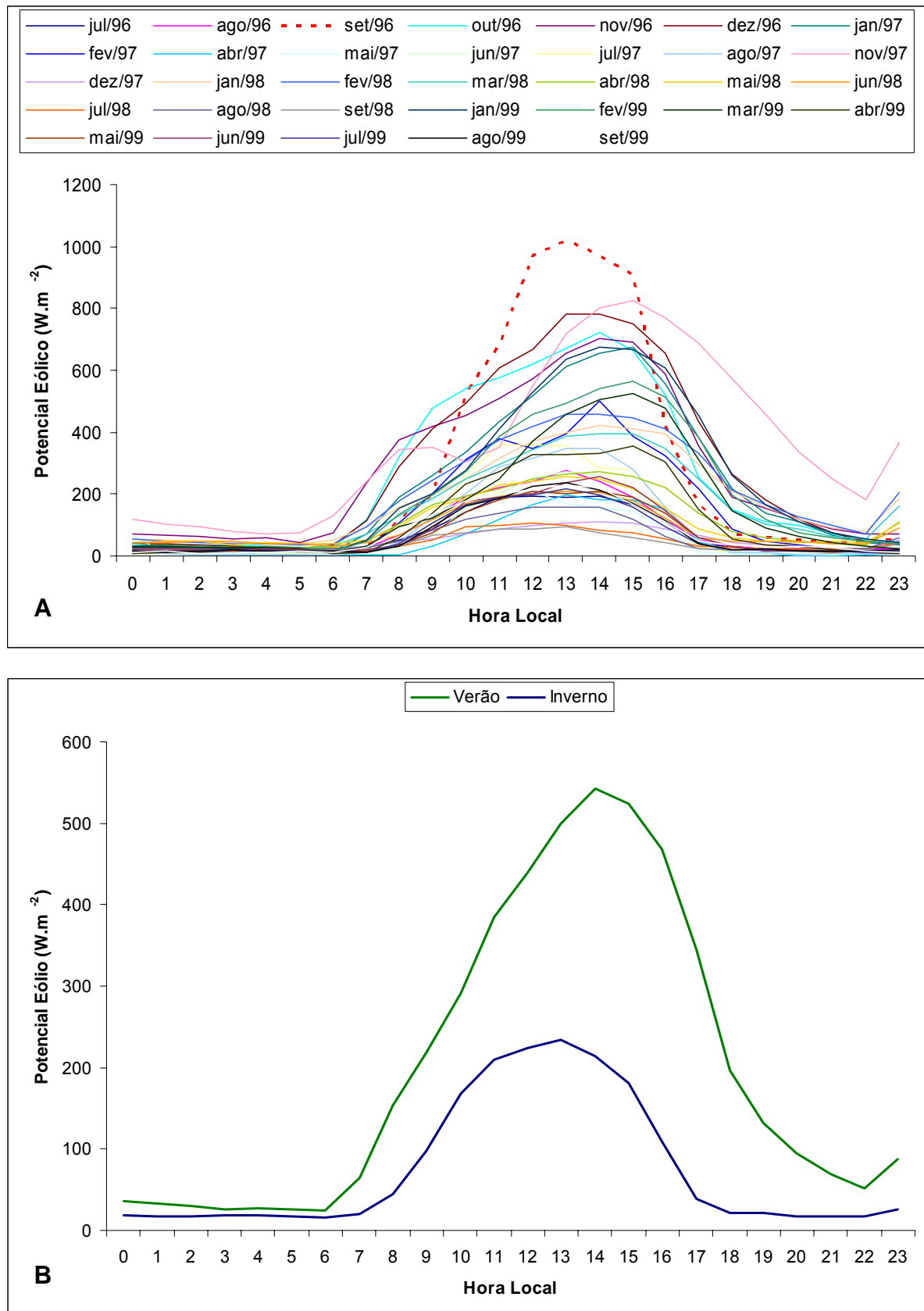


Figura 18 – (A) Ciclo horário do potencial eólico ($w.m^{-2}$) para a região de Pilar – AL durante o período de julho de 1996 a setembro de 1999; **(B)** Ciclo horário do potencial eólico ($w.m^{-2}$) entre inverno e verão.

4.5.2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VELOCIDADE DO VENTO E DO POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO A SETENTA E CINCO METROS

A partir dos valores estimados foi verificada a freqüência dos dados da velocidade do vento a 75m para todo o período em estudo (Figura 19).

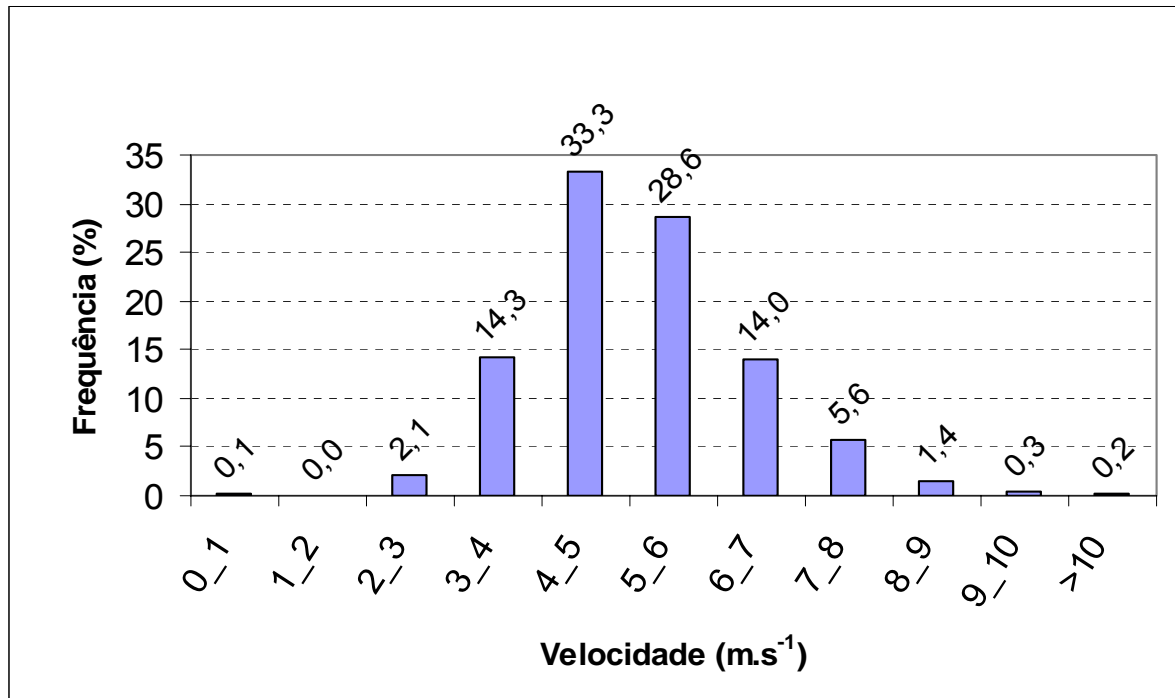


Figura 19 – Distribuição da freqüência para intervalos da velocidade do vento (m.s⁻¹) a 75m para o período de julho de 1996 a setembro de 1999.

Os ventos na faixa de 4 a 5 m.s⁻¹ são os mais freqüentes (33,3%) seguido dos ventos entre 5-6 m.s⁻¹ (28,6%). Vale salientar que não foram verificados ventos na faixa 1-2 m.s⁻¹.

Considerando que a geração elétrica pelas turbinas se inicia com velocidades de ordem de 2,5 e 3,0 m.s⁻¹ (VAZ, 2006). Verificamos que, no local, esta condição é atendida em 99,5% dos casos.

A estatística para o potencial eólico a partir dos valores encontrados a 75m revelou que valores entre 0-100 W.m⁻² são os mais freqüentes (64,4%), seguidos do potencial entre 100 e 200 W.m⁻² (23,3%) e entre 200 e 300 W.m⁻² (6,2%).

Alguns raros eventos apresentaram potencial eólico acima de 1000 W.m⁻² (0,4%).

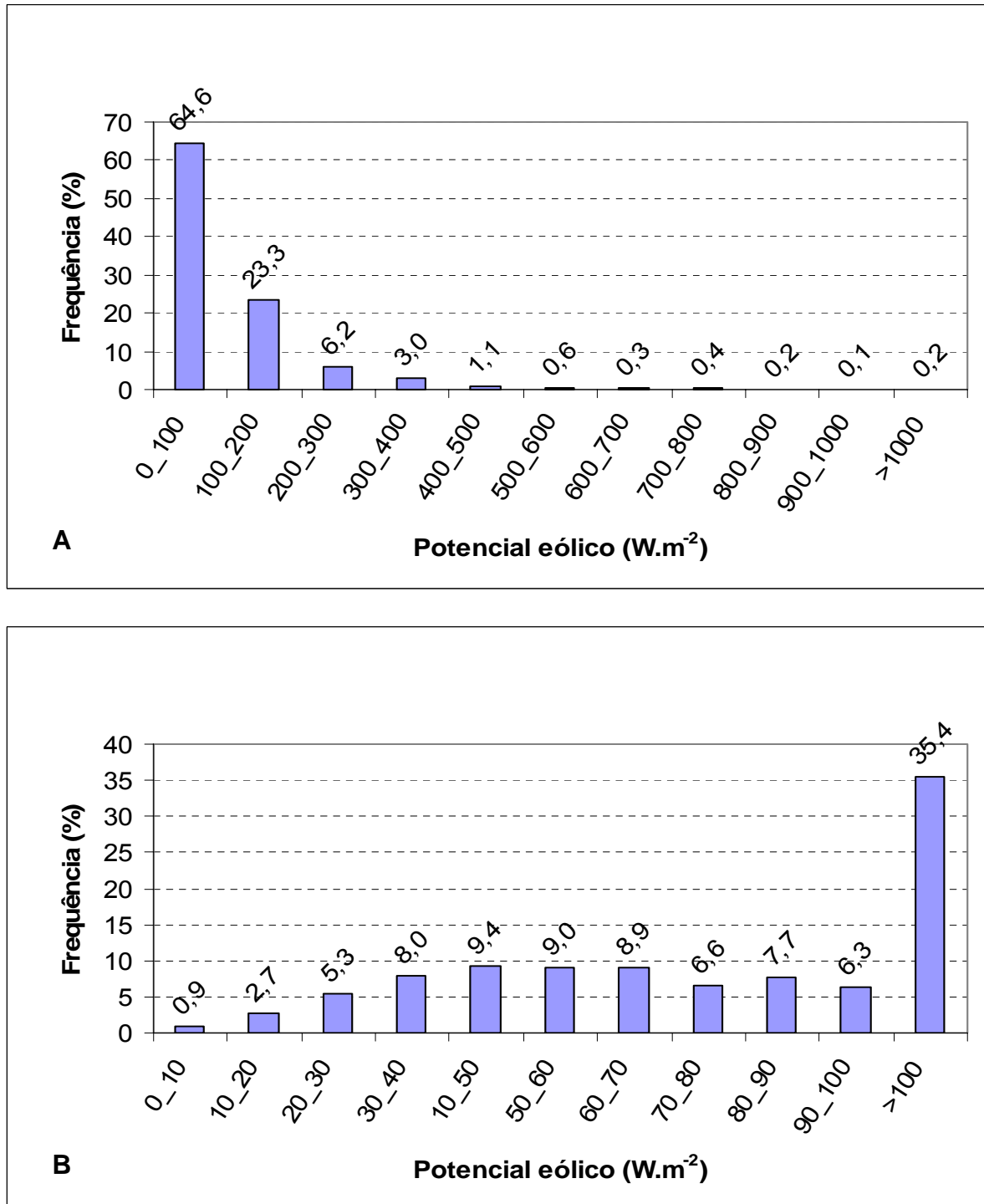


Figura 20 – (A) Distribuição de frequência para intervalos do potencial eólico (W.m²) no período de julho de 1996 a setembro de 1999 entre 0 e 1000 W.m²; **(B)** Distribuição de frequência para intervalos do potencial eólico (W.m²) no período de julho de 1996 a setembro de 1999 entre 0 e 100 W.m².

5.0 – CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos na região de tabuleiros costeiros (Pilar – AL), referentes ao vento, turbulência atmosférica e potencial eólico, permitem chegar as conclusões a seguir:

- O vento é influenciado pelos fenômenos locais e os de grande escala. As brisas são os fatores de escala local mais importante enquanto que o El Niño é o que mais influência tem em termos de grande escala;
 - A velocidade diminui no inverno e aumenta no verão. Em ambas as estações é bem maior durante o dia. Quase metade (46%) dos casos são ventos na faixa de zero até $2,0 \text{ m.s}^{-1}$. Somente em 1997 houve registros de vento acima de 8 m.s^{-1} . A média registrada durante todo o período foi $2,60 \pm 0,90 \text{ m.s}^{-1}$, o valor máximo registrado foi no dia 05 de dezembro de 1997 quando o vento atingiu uma velocidade de $6,07 \text{ m.s}^{-1}$, e o valor mínimo de $0,22 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 03 de maio de 1997;
 - A direção apresenta pouca variabilidade. O fluxo predominante (66%) é no sentido oceano-continente (26% de Leste, 20% de Nordeste e 20% de Sudeste).
- O Índice de Turbulência (It) é inversamente proporcional a velocidade do vento. Conseqüentemente ele tende a ser maior durante o período noturno e no inverno. O valor médio de It foi $0,60 \pm 0,20$, o valor máximo registrado foi no dia 26 de agosto de 1997 igual a 1,31, e o no dia 13 de julho de 1999 foi encontrado um valor mínimo de 0,0;
- O Fator de Rajadas (G) se comporta de maneira similar à It. No entanto, a diferença entre noite e dia e entre inverno e verão são menores. A média encontrada foi $2,34 \pm 0,47$, o valor máximo encontrado foi no dia 11 de setembro de 1998 (5,96), e o valor mínimo de 1,32 no dia 09 de julho de 1998;
- A grande maioria dos valores de velocidade a 75m (99,5%) estão acima da velocidade mínima para funcionamento dos aerogeradores ($\geq 2,5 \text{ m.s}^{-1}$). Velocidades iguais ou superiores a 5 m.s^{-1} ; representaram 42,5% dos casos;

- O potencial eólico varia sazonalmente e ao longo do ciclo diário como a velocidade do vento. A média geral foi de $110,27 \pm 106,51 \text{ W.m}^{-2}$, com máximo $1054,12 \text{ W.m}^{-2}$ (em 27 de outubro de 1996). Na maior parte do tempo (80,5,3%) ele fica na faixa $0-150 \text{ W.m}^{-2}$ sendo que perto de 40% (38,6%) na faixa $50-100 \text{ W.m}^{-2}$.

6.0 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ACEVEDO, O. C.; MORAES, O. L. L.; SILVA, R.; ANABOR, V.; BITENCOURT, D. P.; ZIMMERMANN, H. R.; MAGNAGO, R. O.; DEGRAZIA, G. V. Aspects of the Surface to Atmosphere Exchange in a River Valley Environment. Submetido ao **J. Appl. Meteorol.**, 2005.

AMBIENTEBRASIL. **Energia Eólica.** Disponível em <<http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em 2006.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em 2006.

AVIA, F. **Aerogeradores y su evolución desde un aspecto tecnológico.** *Energía Eólica*, 24-33p., 2001.

BARBANO, M. T.; PINTO, H. S.; BRUNINI, O. Direção predominante do vento para localidade de Campinas – SP. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, XII, Água e Agrometeorologia no novo milênio, Fortaleza – CE. **Anais...** v. 01, Fortaleza – CE, 2001.

BARRETO, A. B.; ARAGÃO, M. R. S.; BRAGA, C.C. Estudo do Ciclo Diário do Vento à superfície no Nordeste do Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, XII, A Meteorologia e a Gestão de Energia, Foz do Iguaçu – PR, **Anais...** Foz do Iguaçu, 2002.

BERGSTROM, H. A statistical analysis of gust characteristics. **Boundary Layer Meteorol.**, v. 39, nº01, p. 153-73, 1988.

BERNARDO, S. de O.; MOLION, L. C. B. Variabilidade do Vento para cidade Maceió – AL. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, XI, A Meteorologia Brasileira Além do Ano 2000, Rio de Janeiro – RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000.

BORBA, J. C.C. **Identificação do Potencial Eólico no estado de Alagoas utilizando dados de reanálises.** Maceió: UFAL/CCEN, 2005, 80p., Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

CASTRO, R. M. G. **Energia renováveis e produção descentralizada – Introdução a energia eólica.** Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico – DEEC/ Seção de Energia. Janeiro de 2003.

CBEE – Centro Brasileiro de Energia Eólica. **Energia Eólica**. Disponível em <<http://www.eolica.com.br>>. Acesso em 2006.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Tutorial de Energia Eólica**. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.htm>. Acesso em 2006.

COLE, F. W. **Introduction to Meteorology**. John Wiley & Sons, New York, 505p., 1980.

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA); GREENPEACE. Wind force 12: a blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020. London: EWEA, 2004. Disponível em: <http://www.ewea.org/documents/WF12-2004_eng.pdf>, Acesso em 2006.

FARIAS, S. E. M. Influência da rugosidade sobre o vento no interior da camada limite noturna: Projeto RBLE. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, IX, Campos do Jordão, **Anais...** v. 02, p. 1234-35, 1996.

FEITOSA, E. A. do N. F.; PEREIRA, A. de L.; SILVA, G. R.; VELEDA, D. R. A.; SILVA, C. C. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**. Brasília: Dupligráfica, 2003.

FERREIRA, R.; LEITE, B. M. da C. **Aproveitamento da Energia Eólica**. Disponível em <<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/eolica/eolica.htm>>, Acesso em 2006.

FISCH, G. Características do perfil vertical do vento no centro de lançamento de foguetes de Alcântara (CLA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, nº 01, 11-21p., 1999.

FILGUEIRAS, A.; SILVA, T. M. V. Wind Energy in Brazil – Present and Future, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 07, nº5, 439-51p., 2003.

GARCIA A.; TORRES, J. L.; PRIETO, E.; FRANCISCO, A. de Fitting Wind Speed Distributions: A case study. **Solar Energy**, Freiburg, v. 62, nº 02, 139-44p., 1998.

GRUBB, M. J.; MEYER, N. I. Wind Energy: Resources, Systems and Regional Strategies. In: JOHANSSON, T. B.; KELLY, H.; REDDY, A.; WILLIAMS, R. **Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity**. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

HOLANDA, S. C. **Análise estatística dos ventos mais intensos em Maceió – AL para o ano de 1996 e Situações sinóticas correlatas.** Maceió: UFAL/CCEN, 2003, Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, 488-98p., 1980.

LAVINA, T. **Alagoas.** Disponível em <
<http://www.coladaweb.com/geografia/alagoas.htm> >, Acesso em 2006.

LEITE, M. de L.; VIRGENS FILHO, J. S. das. Caracterização da direção dos ventos em Ponta Grossa – PR. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, XIII, Situação Atual e Perspectivas da Agrometeorologia. **Anais...** v. 01, Santa Maria – RS, 2003.

LYRA, R. F. da F. Predominância do vento na região de tabuleiros costeiros próximo a Maceió. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, X, Brasília – DF. **Anais...** Brasília – DF, 1998.

MOREIRA, M. H. Meteorologia Aeronáutica 2. *SIPAER*. Plano de Voo. Aeroportos e Proteção ao Voo. São Paulo, n. 36, 89-96 p., Novembro 1996, In: FOGACCIA, C. V. C; FILHO, A. J. P. **Turbulência e Cisalhamento do vento na área do aeroporto internacional de São Paulo/ Guarulhos.** Disponível em <
<http://seila.do.sapo.pt/invest/mr00009.pdf> >, Acesso em 2006.

MOURA, G. B. A.; ARAGÃO, J. O. R.; FILHO, P. F. A.; SILVEIRA, A. B.; FERREIRA, M. A. F. Análise de casos extremos (secos/chuvosos) em Pernambuco: estudo de casos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, X, Brasília – DF. **Anais...** Brasília – DF, 1998.

NICÁCIO, R. M. **Radiação Solar Global e Difusa para a região de Maceió – AL: Medidas e Modelos.** Maceió: UFAL/CCEN, 2002, 107p., Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

NÓBREGA, R. S.; MELO, E. C. de S.; ARAÚJO, J. A. P. de; NETO, A. C. de P.; SARAIVA, F. A. M.; SOARES, D. B.; SOARES, D. N. B. Um estudo observacional de vento à superfície na cidade de Campina Grande – PB. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, XI, A Meteorologia Brasileira Além do Ano 2000, Rio de Janeiro – RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**, London, Methuen, 372p., 1987.

PELLEGRINI, C. C.; MOREIRA, L. Q.; TEIXEIRA Jr, M. G. A altura do aumento de velocidade máximo do vento na camada limite atmosférica sobre colinas em atmosfera diabática. **Ciências e Natura – UFSM**. Especial Micrometeorologia, 2005.

PES, M. P.; GUEDES, M.; ROSETTO, J. G.; BIAZI, L. A.; GUARNIERI, R. A.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SCHUCH, N. J. Distribuição estatística dos ventos na região de São Martinho da Serra por meio da função de Weibull: dados de agosto de 2004 a julho de 2005. **Ciências e Natura – UFSM**. Especial Micrometeorologia, 2005.

PIRES, I. **Aproveitando a força dos ventos**. Agência Meio – Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <<http://www.moderna.com.br/fisica/fisicaonline/leituras/008>>. Acesso em 2006.

REVUE SCIENCES. **Généralités sur les éoliennes**. Disponível em <www.lei.ucl.ac.be/.../EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Generalites/GeneralitesEolien5.htm>, Acesso em 2006.

ROCHA, C. H. E. de A. **Análise do comportamento do vento na região do tabuleiro costeiro próximo a Maceió**. Maceió: UFAL/CCEN, 1999, 45p., Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia.

ROCHA, C. H. E.; LYRA, R. F. da F. OCORRÊNCIA DE BRISAS NA REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS PRÓXIMO A MACEIÓ –AL. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, XI, A Meteorologia Brasileira Além do Ano 2000. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000.

SÁNCHEZ, A. M.; RÚJULA, A. A. B.; PÉREZ, M. P. **La industria de la energía eólica en España – Tecnología y desarrollo regional endógeno**. Boletín Económico de ICE, nº 2740, 2002.

SANTOS, A. S.; GOMES, H. B.; AMORIM, R. F. C.; AMORIM, R. F. C.; PONTES, E. G. S.; MEDEIROS, F. C. Estudo da climatologia dos ventos através dos dados de reanálises: período 1970 – 2002, e sua relação com a precipitação para o estado de Alagoas nos anos 1992/94. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, XIII, Meteorologia e o Desenvolvimento Sustentável, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2004.

SARTORETTO, C. R.; ZANATTA, F. S. **Revisão Bibliográfica sobre energia eólica, Mecanização agrícola I – Utilização de terreno**. Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Passo Fundo, Maio de 1999.

SEMPREVIVA, A. N.; et al. Response of neutral boundary layers to changes of roughness. **Boundary Layer Meteorol.**, v. 50, nº 1 – 4, 205-25p., 1990.

SILVA, J. B.; LARROZA, E. G.; BURGUENO, L. E. T. Estimativa de potencial eólico no Campus da Universidade Federal de Pelotas, em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 08, nº 01, 111-19p., 2000.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTE, E. P.; DANTAS, R. T. Potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 06, nº3, 431-39p., 2002.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTE, E. P.; VENTURA, E. D. Variabilidade Espacial e Temporal do Potencial Eólico da Direção Predominante do Vento no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, nº 02, 189-202p., 2004.

SILVESTRE, E. **Distúrbios nos Ventos de Leste no Atlântico Tropical**, São José dos Campos, INPE, 1996.

SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations. **Electric Power Systems Research**, v. 67, nº 01, 9-20p., 2003.

TEXEIRA, L. **Oscilações do Vento na Estratosfera Equatorial**. CTA/IAE. Relatório técnico. São José dos Campos, SP, Agosto, 1978.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia** – Brasília: INMET. Gráfica e Editora Pax, 2001. 2º Edição.

VAZ, A. Naturlink. **Energia – Quem não precisa dela?**. Disponível em <<http://www.naturlink.pt/canais/Artigo.asp?iArtigo=2092&iLingua=1>>, Acesso em 2006.

VENDRAMINI, E. Z. **Distribuições probabilísticas de velocidades do vento para avaliação do potencial energético eólico**. Botucatu: UNESP, 1986, 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de pós – Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1986.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Ed. UFV. Viçosa Brasil. 448p, 2000.

WINDPOWER monthly news magazine. [Knebel]: Windpower Monthly, v. 16 (2000), v. 19 (2003) In: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>, Acesso em 2006.