



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT  
MESTRADO EM CIÊNCIAS FÍSICAS APLICADAS - MCFA

MARCOS ANTONIO TAVARES LIRA

ESTIMATIVA DOS RECURSOS EÓLICOS NO  
LITORAL CEARENSE USANDO A TEORIA DA  
REGRESSÃO LINEAR

FORTALEZA – CEARÁ

2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MARCOS ANTONIO TAVARES LIRA

ESTIMATIVA DOS RECURSOS EÓLICOS NO  
LITORAL CEARENSE USANDO A TEORIA DA  
REGRESSÃO LINEAR

Dissertação submetida à Coordenação do Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas, área de concentração: Fontes Alternativas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva.

FORTALEZA – CEARÁ

2009

L768e Lira, Marcos Antonio Tavares  
Estimativa dos recursos eólicos no litoral cearense usando a teoria da regressão linear/ Marcos Antonio Tavares Lira. — Fortaleza, 2009.  
85p.  
Orientador: Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva.  
Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceara, Centro de Ciências e Tecnologia.  
1. Energia eólica. 2. Litoral cearense. 3. Regressão linear. 4. Estimativa de ventos. I. Universidade Estadual do Ceara, Centro de Ciências e Tecnologia.  
CDD: 530

MARCOS ANTONIO TAVARES LIRA

ESTIMATIVA DOS RECURSOS EÓLICOS NO LITORAL CEARENSE USANDO  
A TEORIA DA REGRESSÃO LINEAR

Dissertação submetida à Coordenação do Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Físicas Aplicadas, área de concentração: Fontes Alternativas de Energia.

Aprovada em 18 / 12 / 2009.

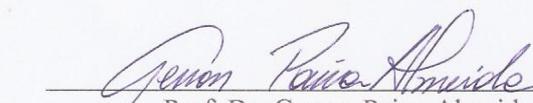
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva

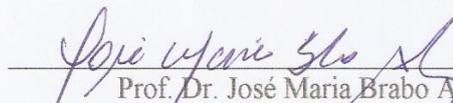
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

Orientador



Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ



Prof. Dr. José Maria Brabo Alves

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

(FUNCEME)

## **DEDICATÓRIA**

Esta Dissertação é dedicada aos meus pais, Marcos Pereira Lira e Maria José Tavares Lira, que sempre me apoiaram na busca pela educação e pelo conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela inspiração e por nunca ter me deixado esmorecer diante das dificuldades;

À minha esposa, Luciana Guimarães, companheira de todas as horas, pelo incentivo na busca pela concretização de meus projetos;

Aos meus irmãos, Conceição, Raimundo e Reginaldo, pelo incentivo incondicional na realização deste projeto pessoal;

Ao Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva, por sua orientação e estímulo na realização deste trabalho e por disponibilizar o Laboratório de Pesquisas Avançadas em Energia Eólica (EOLUS) para o desenvolvimento desta dissertação;

Agradeço ao Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas, na pessoa do seu Coordenador, o Prof. Dr. Alfredo Nelson C. Serejo, pelo seu empenho à frente deste importante curso de Pós-Graduação.

Ao Dr. José Maria Brabo Alves, por sua inestimável contribuição para a realização deste trabalho;

Aos Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida pelas contribuições dadas por ocasião da sua participação na banca de defesa da dissertação;

Aos professores do MCFA Antonio C. Santana dos Santos e Francisco Sales A. Cavalcante, pela participação na banca do exame de qualificação e as contribuições dadas por ocasião de realização da mesma.

Aos professores do MCFA Alexandre A. Costa, Fernando P. Ramalho e Lutero C. de Lima, pela transmissão de conteúdos em suas respectivas disciplinas, as quais tive oportunidade de cursar.

À secretária do MCFA, Maria das Graças, pela sua constante boa vontade e disponibilidade no trato com os alunos.

Aos colegas da graduação e do mestrado, pela partilha de experiências.

“Não há vento favorável  
para quem não sabe aonde  
vai”.

Guilherme de Orange

## RESUMO

O trabalho apresentado trata da estimativa de recursos eólicos, no litoral cearense usando a teoria da regressão linear. Seu objetivo principal é estimar valores de velocidade média do vento em altitude a partir de dados observados a 10 metros. Duas regiões são investigadas: Paracuru e Camocim, ambas situadas no Estado do Ceará. Para cada região será adotada o mesmo procedimento. Inicialmente, caracteriza-se a região a partir do perfil diário e mensal de velocidade média do vento obtidos dos dados brutos da respectiva Plataforma de Coleta de Dados (PCD) e Torre Anemométrica (TA) da região. Os dados caracterizadores da direção predominante do vento também são utilizados. Utilizando-se a equação do perfil logarítmico do vento estimam-se os valores de velocidade média do vento em altitude, para 20, 40 e 60 metros, a partir dos dados observados em superfície a 10 metros, calculando-se em seguida os coeficientes de correlação entre esses dados estimados em altitude e os observados na TA da região. Utiliza-se, em seguida, o modelo de regressão linear para se estimar novos valores em altitude. Inicialmente esse procedimento é feito para um período de calibração do modelo e em seguida para o período de validação do mesmo. Em ambos os períodos o modelo de regressão linear mostrou um bom desempenho quer seja pelo alto índice de concordância entre as series de dados estimados e a série de dados observados e seus respectivos coeficientes de correlação, quer seja pelos baixos valores dos erros entre essas séries. Em algumas situações, na região de Paracuru, encontraram-se valores de coeficientes de correlação da ordem de 0,99 e coeficiente de determinação explicando 98% da variabilidade dos dados observados. Em Paracuru, encontraram-se valores de erros relativos na ordem de 0,02%. Os resultados desse estudo, além de confirmarem que Paracuru e Camocim são regiões potencialmente favoráveis ao aproveitamento da energia eólica, mostraram também que é possível, tendo-se como referência os dados de velocidade média do vento nas PCDs da FUNCEME, se estimar valores de velocidade média do vento em altitude em regiões onde não existem torres anemométricas.

Palavras – chave: Energia eólica, Litoral cearense, Regressão linear, Estimativa de ventos.

## **ABSTRACT**

The current study is the estimate of wind resources in coast of Ceará using the theory of the linear regression. Its main objective is to estimate values of average wind speed at altitude from the data observed at the surface. Two areas are investigated: Paracuru and Camocim both located in the State of Ceará. For each region will be adopted the same procedure. Initially characterized the region from the profile daily and monthly mean wind speed obtained from the raw data of its Platform for Data Collection and anemometric tower in the region. The data on the prevailing wind direction are also used. Using the equation of the logarithmic wind profile estimate the values of average wind speed at altitude for 20, 40 and 60 meters from the data observed at the surface to 10 meters, calculating then the coefficients correlation between these data estimated altitude and the observed TA in the region. Then, we use the linear regression model to estimate new values in altitude. Initially this procedure is done for a period of model calibration for a period of validation. In both periods the linear regression model showed a good performance either by high level of agreement between the data series and the estimated number of observed data and their correlation coefficients, whether the low values of the errors between the series. In some situations, the region of Paracuru, founded values of correlation coefficients of about 0.99, which determination coefficients explains 98% of the variation of the observed data. In Paracuru, founded values of error in the order of 0.02%. The results of this study, besides confirming that Paracuru and Camocim are regions potentially favorable for wind energy, have shown that it is possible, with reference to the data of average wind speed in the PCDs FUNCEME estimate values of average wind speed altitude in regions where there are no anemometric towers.

**Key – words:** Wind power, Coastal Ceará, linear regression, estimate winds.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP - Análise de Componentes Principais.

BAR - Barroquinha.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

CLA - Centro de Lançamento de Alcântara.

ELETRORÁS - Empresa Brasileira de Eletricidade.

ESAM - Escola Superior de Agricultura de Mossoró.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.

GPS - Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global).

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

MAE - Erro Absoluto Médio.

MAER - Ministério da Aeronáutica.

MME - Ministério de Minas e Energia.

PCD - Plataforma de coleta de Dados.

PNE - Plano Nacional de Energia.

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

RAMS - Regional Atmospheric Modeling System (Sistema de Modelagem Atmosférica Regional).

RMSE - Erro Médio Quadrático.

RN - Rio Grande do Norte.

SEINFRA - Secretaria da Infra-Estrutura do Ceará.

SGA - São Gonçalo do Amarante.

SPV - Serviço de Proteção ao Vôo.

TA - Torre Anemométrica.

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical.

ZTD - Zenital Tropospheric Delay (Atraso Zenital Troposférico).

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

FIGURA 1 - Perfil vertical da velocidade do vento. O comprimento da rugosidade ( $z_0$ ) é a altura onde a velocidade é nula. Fonte: Adaptada de Martins (2007).

FIGURA 2 - Mapa do estado do Ceará destacando-se a região de estudo (Paracuru). Fonte: Adaptada do Google mapas.

FIGURA 3 - Mapa do estado do Ceará destacando-se a região de estudo (Camocim). Fonte: Adaptada do Google mapas.

FIGURA 4 - Diagrama de blocos mostrando a sequência do procedimento metodológico.

FIGURA 5 - Perfil diário da velocidade do vento na PCD de SGA.

FIGURA 6 - Médias mensais da velocidade do vento na PCD de SGA.

FIGURA 7 - Perfil diário da velocidade do vento na TA de Paracuru.

FIGURA 8 - Médias mensais da velocidade do vento na TA de Paracuru.

FIGURA 9 - Direção predominante do vento à 10m na PCD de SGA.

FIGURA 10 - Direção predominante do vento à 60m na TA de Paracuru.

FIGURA 11 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de SGA para 60m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 60m na TA de Paracuru (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 dias (b), de 10 dias (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 12 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de SGA para 40m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 40m na TA de Paracuru (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 dias (b), de 10 dias (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 13 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de SGA para 20m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 20m na TA de Paracuru (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 dias (b), de 10 dias (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 14 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 60 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 15 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 40 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 16 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 20 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 17 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 60 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 18 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 40 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 19 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 20 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 20 - Perfil diário da velocidade do vento na PCD de Barroquinha.

FIGURA 21 - Médias mensais da velocidade do vento na PCD de Barroquinha.

FIGURA 22 - Perfil diário da velocidade do vento na TA de Camocim.

FIGURA 23 - Médias mensais da velocidade do vento na TA de Camocim.

FIGURA 24 - Direção predominante do vento à 10m na PCD de Barroquinha.

FIGURA 25 - Direção predominante do vento à 60m na TA de Camocim.

FIGURA 26 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de BAR para 60m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 60m na TA de Camocim (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 27 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de BAR para 60m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 40m na TA de Camocim (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 28 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de BAR para 60m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 20m na TA de Camocim (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 29 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 60 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 30 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 40 metros no período de

calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 31 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 20 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 32 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 60 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 33 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 40 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

FIGURA 34 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 20 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

TABELA 1 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados pelas equações das retas de regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru no período de calibração.

TABELA 2 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados na TA pelas equações das retas de regressão e os dados observados na TA no período de validação para a região de Paracuru.

TABELA 3 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados na TA pelas equações das retas de regressão e os dados observados na TA no período de calibração em Camocim.

TABELA 4 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados na TA pelas equações das retas de regressão e os dados observados na TA no período de validação para a região de Camocim.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Justificativa e objetivo do trabalho .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Aspectos teóricos do campo de vento .....	18
2.1.1 Comportamento do vento na camada-limite superficial .....	21
2.2 Estudos relacionados à quantificação dos ventos no Nordeste brasileiro .....	23
2.3 Estudos relacionados com aplicação do modelo de regressão linear .....	28
2.4 Panorama da geração de energia eólica no Brasil .....	29
2.4.1 O cenário cearense.....	31
<b>3 METODOLOGIA DO ESTUDO .....</b>	<b>33</b>
3.1 Bases de dados utilizados e o método de preenchimento de falhas .....	35
3.2 Período de calibração X período de validação .....	36
3.3 Descrição da aplicação dos procedimentos metodológicos .....	37
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
4.1 Resultados para a região de Paracuru.....	40
4.1.1 Caracterização do regime de ventos na região de Paracuru .....	40
4.1.2 Período de calibração – região de Paracuru .....	44
4.1.3 Período de validação – região de Paracuru .....	52
4.2 Resultados para a região de Camocim .....	57
4.2.1 Caracterização do regime de ventos na região de Camocim.....	57
4.2.2 Período de calibração – região de Camocim .....	61
4.2.3 Período de validação – região de Camocim .....	70
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>76</b>

**6 BIBLIOGRAFIA .....79**

**ANEXO ..... 82**

# 1 INTRODUÇÃO

Assegurar o acesso a fontes de energia limpas e sustentáveis é, sem dúvida, um dos grandes desafios enfrentados pelo mundo moderno (DOBRIANSKY, 2006). Diariamente, os meios midiáticos, quando não abordam diretamente o tema, o fazem de maneira indireta através de algum outro assunto que está relacionado com a energia. Sempre que líderes mundiais se reúnem, a energia é um tema de discussão importante e urgente.

Aproximadamente 2 bilhões de pessoas (cerca de um terço da população mundial) não têm acesso a serviços modernos de energia, condição básica para conduzir as escolas pelo século 21, manter a indústria operando, assegurar o abastecimento de água e expandir a produção agrícola, bem como para iluminar, aquecer e refrigerar centros de saúde.

O incentivo e a promoção do uso da energia a partir de recursos eólicos devem ser diretrizes permanentemente presentes nas políticas públicas voltadas para a segurança energética nacional. O Ceará alcançará, no início de 2010, a marca de 518,33 megawatts (MW) de potência instalada em geração de energia eólica e se tornará o principal estado produtor dessa energia no Brasil. Desse total, 500,93 MW são oriundos dos 14 parques eólicos que estão sendo implantados desde 2007 e 17,4 MW, de três parques instalados na década de 1990

Quando se pretende verificar se uma determinada região é um potencial sítio eólico, faz-se necessário que se tenham dados confiáveis de direção e velocidade média do vento. Constata-se, através de estudos citados nesse trabalho, que a maioria dos dados anemométricos são obtidos em superfície (10 metros de altura), quando o ideal seria a obtenção desses dados na altura onde se pretende instalar o gerador eólico. Na prática, tentando-se amenizar o problema, pode-se recorrer à instalação de torres anemométricas que, durante um curto intervalo de tempo (2 ou 3 anos), irão coletar esses dados.

No entanto, o dispêndio de recursos técnicos e financeiros para se instalar uma torre anemométrica é elevado. E foi nessa perspectiva que este trabalho foi desenvolvido, uma vez que o mesmo apresenta um método para que a partir desses dados de superfície seja possível estimar valores de velocidade do vento em alturas compatíveis com a instalação de geradores eólicos. Desta forma, tornar-se-á possível a estimativa de dados em altitude, em regiões que não possuem torres anemométricas, utilizando-se os dados observados nas Plataformas de Coleta de Dados monitoradas pela FUNCEME.

O método, baseado na utilização de regressão linear simples, mostrou um bom desempenho, caracterizando as duas regiões de estudo, Paracuru e Camocim, como sítios potencialmente favoráveis ao uso da energia eólica.

### **1.1 Justificativa e objetivo do trabalho**

Na maioria dos estudos referentes à quantificação de vento percebe-se que os dados anemométricos (direção e velocidade média do vento) são obtidos em superfície (10 metros de altura), quando o ideal seria que esses dados fossem obtidos em altitudes nas quais o aerogerador irá operar. Para obtenção desses dados em altitude faz-se necessário a instalação de torres anemométricas. No entanto a instalação dessas torres exige um elevado dispêndio de recursos técnicos e financeiros.

A realização do presente trabalho justifica-se pela possibilidade de se desenvolver uma metodologia própria de estimativa de dados de velocidade média do vento em altitude utilizando-se os dados das PCDs da FUNCEME em regiões onde não existe torre anemométrica.

O objetivo principal deste estudo é estimar valores de velocidade média do vento em regiões litorâneas do Ceará usando-se a teoria da regressão linear.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O próximo capítulo contém a revisão bibliográfica apresentando os aspectos relacionados aos recursos eólicos, os

estudos que serviram de referencial teórico para o desenvolvimento desse estudo e uma sucinta descrição do cenário nacional e regional da energia eólica.

O capítulo três traz todo o procedimento metodológico utilizado no trabalho. O capítulo quatro apresenta os resultados e discussões para as duas regiões de estudo e finalmente, o capítulo cinco contém as considerações finais da pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura que serviu de embasamento teórico-referencial para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa. Nele serão abordados conteúdos relacionados aos aspectos físicos do vento, à teoria do método de regressão linear e ao cenário nacional e regional da energia eólica.

### 2.1 Aspectos teóricos do campo de vento

De acordo com Ometto (1981), o aquecimento diferencial da superfície terrestre possibilita a ocorrência de regiões mais aquecidas, sobre as quais o ar atmosférico possui menor densidade. Por sua vez, regiões mais frias, possuem sobre si, ar atmosférico mais denso. A força resultante da necessidade do equilíbrio das diferentes densidades do ar atmosférico estabelece variações na pressão atmosférica, proporcionando o surgimento de gradientes de pressão de características horizontais. O gradiente de pressão estabelece o aparecimento de uma quantidade de movimento (momentum) na massa de ar, e essa quantidade de movimento tanto é maior quanto maior for o gradiente de pressão.

Segundo Varejão-Silva (2006), chama-se vento à componente horizontal ( $\vec{V}_{xy} = u\vec{i} + v\vec{j}$ ) do vetor velocidade do ar  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ , em que  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes do vetor velocidade do vento nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente e,  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$  são os vetores unitários nessas direções. A caracterização do vento em qualquer ponto 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 pelo relevo, vegetação pelo estado de aquecimento da própria superfície subjacente.

A direção do vento exprime a posição do horizonte aparente do observador a partir da qual o vento parece provir, ou seja, de onde o vento sopra e nunca para onde

o vento estaria indo. A direção é expressa em termos do azimute isto é, do ângulo que o vetor velocidade do vento forma com o norte geográfico local ( $0^\circ$ ), medido no mesmo sentido do movimento dos ponteiros de um relógio analógico. Assim, o vento que vem de leste tem direção de  $90^\circ$ , aquele que procede do sul tem direção de  $180^\circ$  (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A análise dos valores da intensidade e direção dos ventos medidos em um determinado local mostra uma variação temporal destes dados. Tal variação está relacionada a um período especificado, indo desde uma variação diária até uma variação interanual. Segundo Silva (2003), o vento pode ser mais intenso em algumas áreas que em outras, pode aumentar sua intensidade por alguns meses do ano, como pode aumentar apenas durante algumas horas do dia, e pode, também, parar por longos períodos ininterruptos. As variações de vento na escala de tempo podem ser divididas em duas grandes classes: variações lentas e variações rápidas.

As variações lentas ocorrem graças às mudanças nas condições climáticas em macroescala. Estas variações afetam o comportamento do vento em áreas de grandes extensões e por períodos que variam de meses a décadas. Esta classe engloba as variações interanuais e as variações sazonais (SILVA, 2003). As variações interanuais no Nordeste brasileiro têm como principais condicionantes as mudanças permanentes nos padrões climáticos do planeta (por exemplo, a elevação da temperatura global) e pequenas irregularidades nos ciclos interanuais da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Todavia, as variações nas regiões próximas ao equador são bem menores que as normalmente observadas nas médias e altas latitudes.

Em adição, as variações sazonais da velocidade e da direção predominante do vento são influenciadas pelo comportamento da circulação geral da atmosfera ao longo do ano. Estas variações estão associadas principalmente à movimentação da ZCIT ao longo do ano e fortes efeitos de mesoescala, como gradientes térmicos oceano-continente no litoral e variações térmicas no interior.

As variações rápidas estão diretamente ligadas às variações dos ventos em mesoescala e microescala. Estas variações afetam o comportamento do vento em áreas

localizadas, por períodos de tempo que variam de dias a segundos (SILVA, 2003). Nesta classe estão: variações diurnas e variações de curta duração. As primeiras são bruscas e fortes, com periodicidade diurna, na velocidade e na direção do vento e estão ligadas às diferenças de temperatura entre superfícies. No litoral do Nordeste brasileiro, estas variações são, principalmente, ocasionadas por brisas marítimas e terrestres.

Durante os dias ensolarados, a superfície do continente se aquece mais rapidamente que a do oceano adjacente. Como consequência surge uma faixa de pressão mais baixa sobre o litoral, ensejando o desenvolvimento de correntes convectivas ascendentes sobre o continente, as quais geram nuvens convectivas. Acima do oceano a pressão é elevada, face à menor temperatura da água à superfície. Dessa maneira, se estabelece uma circulação fechada, com movimentos ascendentes na costa e subsidentes sobre o mar.

O vento, à superfície, sopra do oceano para o continente, em direção aproximadamente perpendicular à linha da costa e é chamado brisa marítima (VAREJÃO-SILVA, 2006). Durante a noite o continente perde uma grande quantidade de calor mais rapidamente que o oceano e, a partir de certa hora após o pôr do Sol, a superfície do oceano apresenta uma temperatura mais elevada que a do continente. A faixa de baixa pressão se situa, então, sobre o oceano e o movimento ascendente associado a ela pode gerar nuvens convectivas. O vento passa a soprar do continente para o mar, à superfície, constituindo a brisa terrestre.

As brisas marítimas contribuem fortemente para um incremento na intensidade e na variação da direção dos Ventos Alísios, ventos de grande escala que atuam ao longo do globo terrestre; além de afetar a temperatura e a umidade do ar na região. As maiores incidências de brisas marítimas, geralmente, ocorrem nos meses de verão. A direção das brisas depende, fundamentalmente, da orientação da costa litorânea; sendo esta perpendicular à linha de praia (SILVA, 2003).

As variações de curta duração são associadas diretamente às condições de superfície do local, como a topografia, a rugosidade e os obstáculos. E variam numa escala de tempo de minutos a décimos de segundos.

### 2.1.1 Comportamento do vento na camada-limite superficial

O escoamento do ar bem como as turbulências em seu fluxo sobre uma determinada região da superfície terrestre são fortemente moldados pelo relevo e pela presença de obstáculos físicos em tal região. A ação da superfície terrestre na redução do momento dos ventos é descrita por uma propriedade física chamada rugosidade. A rugosidade da superfície ocasiona a redução da velocidade do ar e, portanto, da intensidade da força de Coriolis, já que esta é proporcional ao módulo da velocidade (MARTINS, 2008).

A região compreendida entre a superfície terrestre e a altitude de aproximadamente 3000 metros é definida como camada-limite planetária (STULL, 1988). Esta camada possui uma subcamada, situada na região não excedente a 150 metros de altitude chamada camada-limite superficial, na qual a influência da superfície é notadamente dominante. É nesta subcamada que ocorrem os intercâmbios de momento, calor e umidade entre a superfície e o ar atmosférico.

Além do comportamento turbulento devido às interações superfície-atmosfera, outro aspecto importante a ser considerado é o cisalhamento do vento (MARTINS, 2008). Na camada-limite superficial observa-se um perfil vertical aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade do vento, como apresentado graficamente na Figura 1.

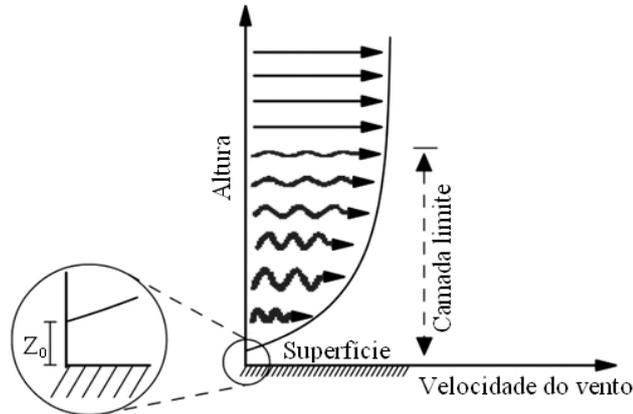


FIGURA 1 - Perfil vertical da velocidade do vento. O comprimento da rugosidade ( $z_0$ ) é a altura onde a velocidade é nula. Fonte: Adaptada de Martins (2007).

A expressão logarítmica empírica e teórica para a variação da velocidade do vento na vertical em uma camada limite turbulenta desenvolvida por Prandtl é mostrada abaixo:

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

onde a variação da velocidade com a altura vertical  $z$ , é dada em função da velocidade de fricção ( $v^*$ ), da constante de Von Karmán ( $k$ ), e do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ). O comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero, e depende do relevo e obstáculos da superfície. Contudo, o perfil real de velocidades na vertical depende também da variabilidade de temperatura e pressão na atmosfera (MARTINS, 2008).

A velocidade de fricção, que varia com a rugosidade do solo, com a velocidade do vento e com forças que se desenvolvem na atmosfera é um parâmetro difícil de se calcular. Para contornar esta dificuldade, considerando-se que o uso habitual da equação (1) é a extrapolação para alturas diferentes de dados medidos a uma altura de referência, usa-se, na prática, a equação (2).

$$v(z) = v(z_R) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (2)$$

em que  $v(z_R)$  é a velocidade média à altura de referência  $z_R$ .

Fisch e Roballo (2009) utilizaram a equação (2) para estimar valores de velocidade do vento na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) usando um túnel de vento. Para o período em estudo os autores obtiveram resultados que se ajustam bem aos dados observados.

Lyra e Pereira (2007) estimaram valores do coeficiente de rugosidade sobre vegetação esparsa em uma região semi-árida a partir da equação (2). Os dados estimados mostraram que a equação, comparando-se com outros métodos, foi a que apresentou resultados mais condizentes com os valores reais observados.

## **2.2 Estudos relacionados à quantificação dos ventos no Nordeste brasileiro**

No que diz respeito ao estudo dos regimes dos ventos, tem sido observada na região Nordeste do Brasil, uma considerável atenção dada ao Estado do Ceará. Os estudos são aplicados em várias áreas que, direta ou indiretamente, estão ligadas aos elementos caracterizadores do vento. A seguir descrevem-se de maneira sucinta alguns destes estudos, os quais contribuíram significativamente com o desenvolvimento deste trabalho, na medida em que nos inserem dentro do cenário da produção acadêmica voltada para a temática da quantificação dos ventos e do seu aproveitamento na geração de energia eólico-elétrica.

Molion e Bernardo (2000) estudaram a variabilidade horária do vento e sua influência na circulação de brisa, procurando estabelecer uma possível associação entre vento e ocorrência de precipitação em horários específicos do dia. Neste estudo, eles utilizaram dados horários do vento (direção e intensidade) e de precipitação

pluviométrica, coletados pelo Serviço de Proteção ao Vôo (SPV) do Ministério da Aeronáutica (MAER), no Aeroporto de Maceió, no período de 1991-1996. A parte da instrumentação, cujos dados foram usados no estudo, foi montada próxima à pista de pouso e é constituída de uma estação automática com sensores de vento, velocidade e direção, a 10 metros de altura, livres de obstruções.

Constataram que a brisa marítima, que ocorre durante o dia, está em fase com os Ventos Alísios, portanto soma-se a estes, fazendo com que a velocidade do vento atinja facilmente valores superiores a 5,0 m/s. Já a brisa terrestre, que ocorreu no período noturno, com velocidades inferiores a 1,0 m/s se contrapõem ao campo dos Alísios e suas velocidades se subtraem, fazendo com que, muitas vezes, tenham-se calmarias algumas horas do período noturno.

Silva, Alves e Cavalcanti (2002) realizaram uma pesquisa onde determinam a potência eólica da direção predominante do vento das 22 Estações Climatológicas do INMET localizadas no Estado da Bahia. Foram consideradas todas as medições de direções e velocidades médias dos ventos obtidas à 10 metros da superfície, no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981. A pesquisa permitiu concluir que a direção predominante do vento na Bahia apresenta predominância das direções Leste e Sudeste, e que a distribuição de Weibull representou adequadamente a distribuição de frequências da velocidade do vento. A potência eólica no Estado da Bahia apresentou grande variabilidade mensal nas diversas localidades, no entanto, identificaram-se sítios com potencial para geração de energia eólica.

Barreto, Aragão e Braga (2002) realizaram um estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil determinando padrões de sua variabilidade através da análise em componentes principais. Neste estudo foram utilizados dados horários do vento à superfície coletados em cinco anos de observações, 1977 a 1981, provenientes de anemógrafos universais, cujos sensores se encontram a 10 metros de altura em 77 estações da Rede Climatológica do Nordeste operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O estudo acima citado aponta que na faixa litorânea do Nordeste do Brasil, as mudanças observadas na direção e intensidade do vento no decorrer das 24 horas do dia são, na quase totalidade dos estados, um sinal evidente da interação entre o escoamento de grande escala (Ventos Alísios) e as circulações de brisa marítima/terrestre. Na faixa litorânea do Rio Grande do Norte a Pernambuco, o vento é de sudeste, sendo de moderado a forte no período diurno e de moderado a fraco no período noturno, ao passo que o escoamento médio também é de sudeste, sendo moderado no Rio Grande do Norte e Paraíba e fraco em Pernambuco.

O estudo mostrou ainda que na faixa litorânea da Bahia, a intensidade do vento é fraca em ambos os períodos, exceto por volta das 15:00h horário local, quando o vento é moderado. Na faixa litorânea do Maranhão, Piauí, Ceará, Alagoas e Sergipe, o vento é de moderado a forte no período diurno e de moderado a fraco no período noturno. Como conclusão os autores apontam que nas áreas litorâneas o vento intensifica no período diurno, atingindo intensidade máxima no início-meio da tarde em resposta à interação entre o escoamento médio e a brisa marítima. Há desintensificação no período noturno com a atuação da brisa terrestre em sentido oposto ao do escoamento médio, o que ocasiona um mínimo de intensidade no final da noite-início da manhã.

Chou et al. (2006) realizaram um estudo no qual mostram o mapeamento eólico para o Nordeste a partir de simulações do Modelo Eta, com 10 km de resolução horizontal, onde as médias anual e sazonal foram catalogadas para os ventos a 50 metros. Ressaltam também que as principais regiões de ventos intensos e persistentes coincidiram com as regiões indicadas pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Ministério de Minas e Energia e que os principais pontos de destaque foram a divisa entre Piauí e Ceará, a divisa entre Piauí e Pernambuco, várias áreas na Chapada Diamantina na Bahia, litoral e faixa em pontos altos da Serra da Borborema, no Rio Grande do Norte e Pernambuco, litoral e algumas regiões altas no Ceará.

Leal Júnior et al. (2006) estudaram a variabilidade temporal do vento no estado do Ceará para identificação de padrões de circulação local. A série temporal de

velocidade do vento, no período que vai de junho de 2002 até fevereiro de 2006, foi obtida através de anemômetros localizados a 10 metros de altura nas Plataformas de Coleta de Dados (PCD) da FUNCEME. Sobre esta série foi feita uma Análise de Componentes Principais (ACP) que é utilizada quando se deseja reduzir a dimensão do problema, permitindo uma interpretação em um espaço de pequenas dimensões e reduzindo-se ao máximo a perda de informação.

Concluíram que a primeira componente explica aproximadamente quase 46% da variância total do vento observado em superfície, deixando as outras com pequena porcentagem da variância. O que significa que grande parte da informação sobre a variabilidade temporal está incluída nessa componente. Além disso, dois padrões distintos de circulação foram observados: regiões serranas, situadas na chapada da Ibiapaba, noroeste do Ceará e na serra de Baturité, centro norte do Ceará, e região litorânea, ao longo da costa do estado, penetrando no continente, contornando as serras e acompanhando os rios Jaguaribe e Acaraú.

Sacramento et al. (2006) realizaram um estudo preliminar sobre o potencial eólico da Serra da Ibiapaba situada no Estado do Ceará. Neste estudo foram utilizados os dados das PCDs da FUNCEME. Foram selecionadas duas PCDs localizadas na serra da Ibiapaba (cidades de São Benedito e Ubajara) que estiveram em funcionamento por um período de um ano (Janeiro a Dezembro / 2005). Os dados de vento foram medidos a 10 metros de altitude.

Os resultados deste estudo mostraram que nas regiões serranas é pequena a variabilidade do vento. Segundo os autores isso é devido ao fato do clima ser atípico, dado a altitude das regiões. O período de ventos mínimos coincidiu com o período chuvoso do Estado, enquanto o período de ventos máximos coincidiu com o período mais seco do Estado. Dado a direção predominante dos ventos, concluíram também que o principal forçante dos ventos são os Ventos Alísios, sendo intensificado ou enfraquecido pelo seu acoplamento com a circulação vale-montanha, nas regiões de São Benedito e Ubajara, indicando as mesmas como detentoras de um ótimo potencial eólico.

Santiago de Maria, Costa e Sombra (2006) realizaram uma simulação da circulação de vento sobre o estado do Ceará. As duas regiões mais enfatizadas foram o Litoral Norte e o entorno do Litoral de Fortaleza. Neste estudo, uma simulação em alta resolução espacial foi feita com o *Regional Atmospheric Modeling System* – RAMS em sua versão 6.0, com o propósito de avaliar preliminarmente a habilidade do modelo em trabalhar como sistema de previsão de ventos para geração de energia eólica.

No trabalho acima citado, dois tipos de estações foram usadas na coleta dos dados observacionais: as Torres Anemométricas (TAs) e as Plataformas de Coleta de Dados (PCDs). Nas TAs, a velocidade do vento foi medida em três níveis (20, 40 e 60 metros acima do solo) e a direção em 2 níveis (40 e 60 metros).

Os autores concluíram que, de forma geral, o modelo mostrou-se competente ao realizar as tarefas para as quais foi destinado. Além disso, correções estatísticas forneceram uma solução para os períodos que o modelo menos se aproximou da realidade, e assim constatou-se que maiores graus dos polinômios da correção podem resultar em melhores correlações com dados observados, oferecendo resultados bastante promissores no que tange ao uso aplicado do modelo em um sistema operacional de previsão de ventos para geração de energia eólica.

Camelo et al. (2006) estudaram a circulação local na região do Vale do Rio Jaguaribe no Estado do Ceará. Para simular a evolução temporal do vento ao longo do Rio Jaguaribe foi utilizada a versão 6.0 do RAMS. Esta evolução temporal da velocidade do vento comparada aos dados observados nas PCDs da FUNCEME à 10 metros de altura, no período de 01 a 30 de novembro de 2005.

Como resultado foi identificado o aparecimento de uma região com máximo de velocidade do vento paralelo à costa, na região do Rio Jaguaribe, a partir das 20:00h horário local, se dispersando depois de 00:00h horário local. Sua trajetória segue o curso do Rio Jaguaribe, adentrando o sertão do Ceará. Adicionalmente, comparou-se a simulação com os dados observados nos municípios ao longo do Rio Jaguaribe para velocidade e constatou-se que o RAMS tende a reproduzir de maneira satisfatória os campos observacionais.

Juliana (2007) analisou a influência da variabilidade climática e os impactos da circulação geral no comportamento dos ventos sobre o Nordeste do Brasil, com enfoque no estado do Ceará utilizando o RAMS. Concluiu que a ocorrência de El Niño e dipolo positivo no Atlântico apresentam condições significativamente melhores para a geração de energia eólica, enquanto que no cenário de La Niña e dipolo negativo, tem-se chuva e conseqüentemente reservatórios abastecidos proporcionando melhores condições para geração de energia hidrelétrica.

Todos os trabalhos acima citados evidenciam o quanto se tem enfatizado ao longo da última década o estudo da quantificação da velocidade ou do regime de ventos, no Nordeste Brasileiro e, particularmente, no Ceará. Um fator que contribuiu de forma definitiva para o aumento do interesse por esta área de estudo foi o cenário relacionado ao setor elétrico brasileiro que, visando diversificar a matriz energética nacional, criou condições favoráveis para o investimento de recursos técnicos e financeiros para o aproveitamento da energia eólica.

Em adição, constata-se que nos estudos supracitados todos os dados relacionados à velocidade dos ventos são obtidos em superfície (10 metros de altura), nível indicado pela WMO - World Meteorology Organization (Organização Meteorológica Mundial), quando o ideal seria a obtenção desses dados na altura onde se pretende instalar o gerador eólico. Na prática, tentando-se amenizar o problema, pode-se recorrer à instalação de torres anemométricas que, durante um curto intervalo de tempo (2 ou 3 anos), irão coletar esses dados. No entanto, o dispêndio de recursos técnicos e financeiros para se instalar uma torre desse tipo é elevado. E foi nessa perspectiva que este trabalho foi desenvolvido, uma vez que o mesmo apresenta um método para que a partir desses dados de superfície seja possível estimar valores de velocidade do vento em alturas compatíveis com a instalação de geradores eólicos.

### **2.3 Estudos relacionados com aplicação do modelo de regressão linear**

Fisch et al. (1998) realizaram uma comparação entre os dados de velocidades de vento obtidos por radiossondagens meteorológicas, utilizando os

sistemas OMEGA (atualmente desativado) e GPS (em uso). Os resultados indicam que há uma boa concordância entre os perfis de vento gerado por estes dois sistemas. O uso de regressão linear para representar as velocidades do vento derivadas pelos dois métodos apresentou resultados satisfatórios, com coeficiente de correlação de 0,91.

A análise das intensidades de vento estimadas pelo altímetro a bordo do satélite TOPEX/Poseidon e dados medidos *in situ* a bordo de navios para o Atlântico Sul Ocidental foi realizada por Velhote e Ghisolfi (1996). A análise se deu a partir de uma regressão linear entre os dados medidos e os dados estimados, sendo obtido coeficiente de correlação igual a 0,82.

Marques et al. (2007) realizaram uma análise de diversas variáveis meteorológicas (dentre elas, o vento) medidas na superfície terrestre para verificar sua contribuição na modelagem do ZTD (Atraso Zenital Troposférico – Zenital Tropospheric Delay), o qual é resultante da diminuição da velocidade de propagação dos sinais de radiofrequência devido à influência dos elementos que compõem as camadas mais baixas da atmosfera terrestre. Tanto os valores do ZTD quanto os valores de superfície foram obtidos a partir das observações realizadas por diversas radiossondas lançadas sobre a cidade de Curitiba. Como resultado, a análise de correlação mostrou que a pressão atmosférica apresentou uma correlação de 1,0 com a componente hidrostática do Atraso Zenital Troposférico e, para a pressão parcial hidrostática essa correlação foi de 0,8.

## **2.4 Panorama da geração de energia eólica no Brasil**

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. 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.

Em relação ao cenário brasileiro, o Governo brasileiro criou, em 2002, o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), o qual caracteriza-se como um importante instrumento para a diversificação da matriz energética nacional, garantindo maior confiabilidade e segurança ao abastecimento de energia elétrica no país. É o PROINFA que coordena as questões relativas à energia eólica em todo o país. O Programa consiste na garantia de compra da energia elétrica pela ELETROBRÁS, e financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) em até 80% do investimento total nas usinas.

Até o início de 2010 outros parques que estão em construção devem começar a operar, o que elevará a potência instalada no país para 900 MW. O Plano Nacional de Energia – PNE 2030, elaborado pelo Governo Federal através do Ministério das Minas e Energia, MME, aponta para um cenário energético em 2030 onde será atingida uma potência instalada (em todo o território nacional) da ordem de 4682 MW produzidos a partir de centrais eólicas.

Ainda em relação ao cenário nacional, destaca-se a realização no último mês de junho (2009), em Natal (RN), do I Fórum Nacional Eólico. Na ocasião, o ministro do Meio Ambiente e dez secretários de vários estados assinaram um documento intitulado de “Carta dos Ventos”, a qual incentiva a participação de energia eólica na matriz energética brasileira. Entre as especificações da carta, estão previstos o estabelecimento do marco regulatório específico ao segmento eólico; o desenvolvimento da infra-estrutura em regiões de potencial eólico reconhecido; e a definição de um calendário anual para a realização de leilões exclusivos de energia eólica, incluindo metas anuais de expansão e com tarifas adequadas às características da geração eólica.

A Carta dos Ventos também tem como objetivos promover a articulação institucional e a integração entre as diferentes instâncias dos governos federal e estaduais; e criar programas de incentivos financeiros, fiscais e tributários que atendam a cadeia produtiva do mercado eólico, desde o fornecimento dos equipamentos, construção dos empreendimentos, até a venda da energia elétrica.

#### 2.4.1 O Cenário Cearense

Na atual conjuntura energética e ambiental, percebe-se uma evidente preocupação com os recursos naturais e o desenvolvimento sustentável, a fim de colocar o Estado do Ceará na liderança do mercado de energias alternativas no Brasil. Com 2.800 horas de sol por ano, 573 quilômetros de costa e as melhores condições de ventos no País, o Ceará deslancha no cenário mundial de geração de energia por meio de fontes alternativas.

No litoral do Estado do Ceará existem 543 km<sup>2</sup> de dunas, formadas por ventos intensos e constantes. As usinas eólico-elétricas que já operam no estado apresentam alto desempenho, aproveitando as vantagens da baixíssima rugosidade da areia de dunas e suas elevações orográficas. O Ceará está entre as melhores regiões do mundo para o aproveitamento eólico, não só pelo potencial dos ventos alísios, como também pela crescente demanda de energia resultante de seu desenvolvimento econômico.

Com área territorial de 147.348 km<sup>2</sup> e situado no Nordeste do Brasil, o Estado do Ceará está imerso na contínua circulação atmosférica sub-equatorial dos ventos alísios, intensificados pelas brisas marinhas ao longo de todo o seu perímetro litorâneo com o Oceano Atlântico. Superpondo-se a estes fatores, a movimentação da Zona de Convergência Intertropical induz uma pronunciada sazonalidade nos regimes de vento.

A sazonalidade dos ventos no Estado do Ceará é complementar ao regime hídrico predominante na geração hidrelétrica no Brasil. Como cerca de 90% da produção de energia elétrica brasileira é proveniente de usinas hidrelétricas, o potencial eólico do Estado do Ceará é máximo justamente no período de níveis mínimos de reservatórios, onde os custos associados de geração e os riscos de déficit são máximos. Uma participação de usinas eólicas no sistema elétrico poderá contribuir significativamente para uma melhor estabilização sazonal da oferta de energia no Estado do Ceará.

O Ceará alcançará, no início de 2010, a marca de 518,33 megawatts (MW) de potência instalada em geração de energia eólica e se tornará o principal estado produtor dessa energia no Brasil. Desse total, 500,93 MW são oriundos dos 14 parques eólicos que estão sendo implantados desde 2007 e 17,4 MW, de três parques instalados na década de 1990. Nos próximos meses entrará em funcionamento, o restante dos 14 parques eólicos do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) do Governo Federal. Até agora, das 10 usinas nove entraram em funcionamento, restando quatro, que devem ser inauguradas até o início de 2010. Atualmente, o Estado conta com uma potência instalada de 309,63 MW, o que lhe dá o primeiro lugar no País na produção de energia eólica (SEINFRA, 2009).

Em adição, O Ceará conta com 21 projetos contemplados no primeiro leilão de energia eólica do Brasil. Os projetos totalizam 542,7 MW de potência instalada. O início do suprimento se dará em 2012 e os contratos de fornecimento de energia terão duração de 20 anos e serão celebrados entre os agentes vencedores e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica e o preço médio foi de R\$ 148,39 por megawatts-hora (MWh).

O atual Atlas Eólico do Estado estabeleceu que o potencial viável do Ceará é de mais de 25 mil MW on-shore (em terra), podendo chegar a 35,5 mil MW pelo aproveitamento da plataforma continental (off-shore). No entanto os dados do Atlas Eólico devem passar por uma atualização, uma vez que os mesmos foram catalogados há nove anos com medições de ventos nas altitudes de 50 e 70 metros, fazendo-se necessário um novo levantamento de dados de ventos em níveis mais elevados de altura.

### 3 METODOLOGIA DO ESTUDO

No desenvolvimento deste trabalho duas regiões geográficas distintas do Estado do Ceará serão investigadas. A primeira se refere à região de Paracuru e a segunda à região de Camocim. Para fins de localização geográfica, as Figuras 2 e 3 apresentam o mapa do Estado do Ceará com destaque para a região de estudo e sua respectiva TA e PCD.

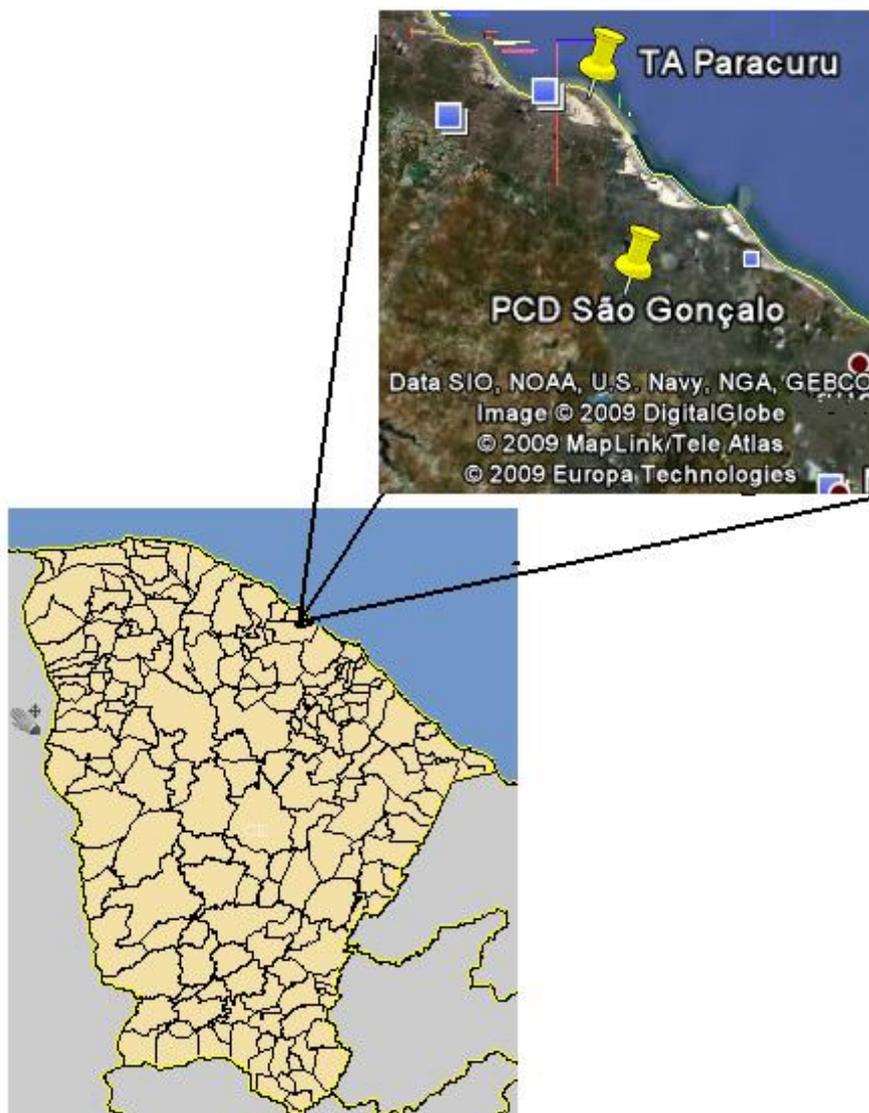


FIGURA 2 - Mapa do estado do Ceará destacando-se a região de estudo (Paracuru). Fonte: Adaptada do Google mapas.

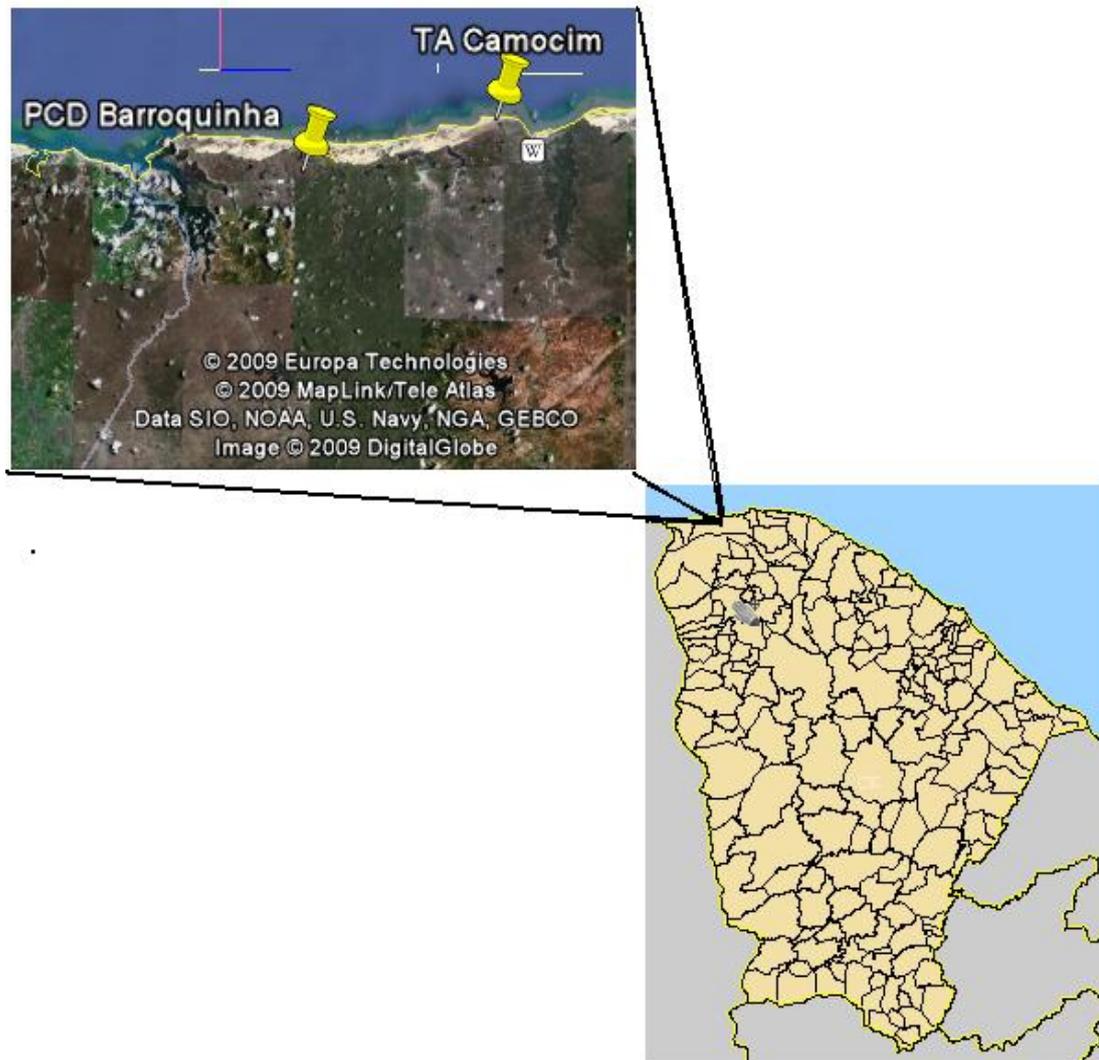


FIGURA 3 - Mapa do estado do Ceará destacando-se a região de estudo (Camocim). Fonte: Adaptada do Google maps.

A região de Paracuru compreende a TA situada na cidade de Paracuru e a PCD situada na cidade de São Gonçalo do Amarante (SGA). A torre anemométrica situada na cidade de Paracuru está instalada num ponto com as seguintes coordenadas geográficas:  $03^{\circ} 24' 42,4''S$  e  $38^{\circ} 59' 02,8''W$ . Já a PCD, situada na cidade de São Gonçalo do Amarante, está instalada num ponto de coordenadas  $03^{\circ} 39' 0,8''S$  e  $38^{\circ} 56' 32,6''W$ . O anemógrafo utilizado para medição na TA possui uma taxa de amostragem de 0,5Hz (sinais instantâneos a cada 2 segundos) e foi programado para realizar registros num intervalo de integração de 10 minutos.

A região de Camocim compreende a TA situada na cidade de Camocim e a PCD situada na cidade de Barroquinha. A torre anemométrica situada na cidade de Camocim está instalada num ponto com as seguintes coordenadas geográficas: 02° 51' 56,7''S e 40° 53' 09,2''W. Já a PCD, situada na cidade de Barroquinha (BAR), está instalada num ponto de coordenadas 2°55' 48,2''S e 41° 7' 7,3''W.

### **3.1 Bases de dados utilizados e o método de preenchimento de falhas**

Os dados de velocidade e direção dos ventos utilizados neste estudo foram obtidos a partir de duas fontes: das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) monitoradas pela FUNCEME e das Torres Anemométricas (TAs) de propriedade da SEINFRA/CE.

As TAs são dotadas de sensores para medição da velocidade do vento em três níveis (20, 40 e 60 metros) e para medição da direção do vento em dois níveis (40 e 60 metros). Já as PCDs possuem sensores para medição da velocidade e direção do vento à 10 metros da superfície.

Os dados de velocidade de vento tanto das TAs quanto das PCDs foram utilizados para o levantamento das médias diárias, de 5, 10 e de 15 dias, em ambas as regiões de estudo.

Com os dados disponíveis de velocidade e direção do vento desenvolveu-se a primeira etapa proposta na metodologia do projeto de dissertação. Vale ressaltar que foram identificados, nos dados brutos, alguns valores inconsistentes e até mesmo inexistentes. Na TA de Paracuru os dados inconsistentes foram registrados no período de 15 a 30 de novembro de 2004, com valores de velocidades médias do vento acima de 50 m/s; na PCD de BAR não existiam dados em praticamente todo o período de 4 a 12 de julho de 2005 e na TA de Camocim havia apenas um dado inexistente, identificado em 13 de novembro de 2004. Para solucionar esse problema optou-se pela utilização do método de preenchimento de falhas denominado método de validação cruzada.

O método de validação cruzada é o procedimento mediante o qual cada amostra é retirada do conjunto de dados e é feita uma interpolação para avaliar seu valor. A validação cruzada assume que em um determinado ponto, que não tenha sido coletado os dados, o valor é estimado a partir dos dados circundantes. Após essa estimativa, o valor poderá ser re-introduzido na série de dados. Essa estimativa é feita por krigagem. Para se fazer a estimativa em um único ponto de uma região de estudo através da krigagem, utiliza-se o estimador pontual da Krigagem ordinária dado por:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) , \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

Onde  $z(x_i)$  é o valor medido da variável de estudo  $z(\mathbf{x})$  no ponto  $\mathbf{x}_i$ ;  $n$  é o número de valores medidos  $z(\mathbf{x}_i)$  e  $\lambda_i$  são pesos atribuídos a cada valor medido de acordo com sua representatividade na estimação no ponto  $\mathbf{x}_0$ .

### 3.2 Período de calibração X período de validação

Considerando-se que o principal objetivo deste trabalho é a previsão de recursos eólicos em altitude a partir de dados de PCDs em regiões onde não existem TAs, particularmente em regiões litorâneas do Ceará, fez-se necessário correlacionar os dados das PCDs com os dados das TAs a fim de se investigar o quanto um conjunto de dados explica o outro. Assim, na região de Paracuru correlacionou-se os dados da TA da cidade de Paracuru com os dados da PCD da cidade de São Gonçalo do Amarante, enquanto que na região de Camocim correlacionou-se os dados da TA da cidade de Camocim com os dados da PCD da cidade de Barroquinha.

Os dados relacionados à TA de Paracuru e à PCD de São Gonçalo do Amarante foram extraídos de uma série temporal que vai de 18/08/04 a 09/05/06, totalizando 630 dias de observações. Essa série foi dividida em duas partes sendo que o período que compreende os primeiros 360 dias foi chamado de período de calibração e o período que compreende os 270 dias restantes foi chamado de período de validação.

Já os dados relacionados à TA de Camocim e à PCD de Barroquinha foram extraídos de uma série temporal que vai de 22/08/04 a 12/02/06, totalizando 540 dias de observações. Essa série também foi dividida em duas partes sendo que o período de calibração compreende os primeiros 360 dias e o período de validação compreende os 180 dias restantes. A razão pela qual se utilizou uma série temporal menor para esta região baseia-se no fato de que o período de dados observados é limitado.

### 3.3 Descrição da aplicação dos procedimentos metodológicos

O diagrama de blocos mostrado na Figura 4 sintetiza a sequência dos procedimentos metodológicos descritos nesta seção.

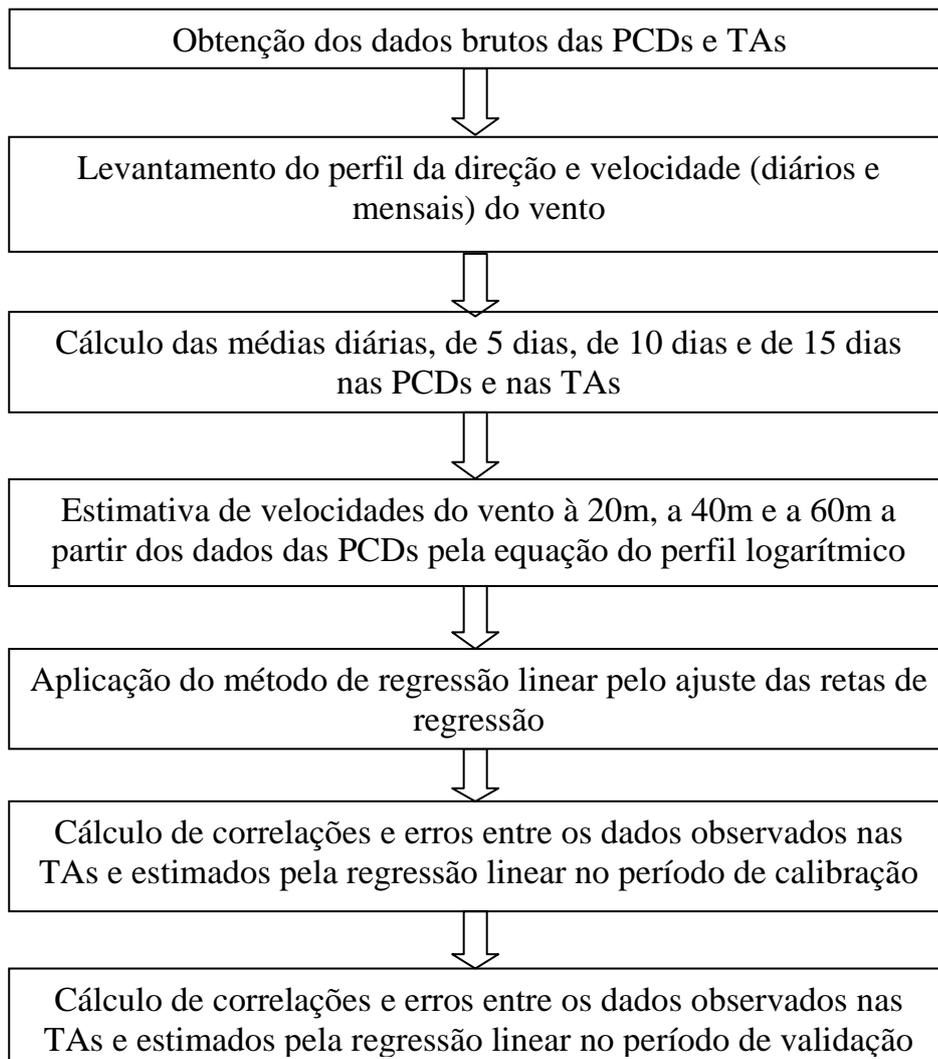


FIGURA 4 - Diagrama de blocos mostrando a sequência do procedimento metodológico.

Tanto para a região de Camocim quanto para a região de Paracuru, a partir das séries de dados de velocidade do vento nas PCDs e nas TAs, calcularam-se as médias em quatro intervalos distintos (diários, 5, 10 e 15 dias). Em seguida, adotando-se os dados da PCD como referência, aplicou-se os mesmos na equação 2, equação do perfil logarítmico do vento, mostrada na seção 2.1.1, a fim de se estimar valores da velocidade do vento à 20 metros, à 40 metros e à 60 metros de altura e a partir daí se estabelecer uma comparação com os dados da respectiva TA. Vale ressaltar que na aplicação da equação acima citada foi adotado o valor de  $Z_0$  da literatura para regiões litorâneas, que é de 0,0002 (CARVALHO, 2003; CASTRO, 2007; FERREIRA, 2008).

Na sequência, para o período de calibração, investigou-se a existência de correlação para os três níveis de altura entre os dados estimados a partir dos dados em superfície, coletados nas PCDs, e os dados observados em altitude nas TAs. Cada diagrama de dispersão construído no período de calibração gerou a equação de uma reta bem com seu respectivo coeficiente de dispersão. A partir de então, aplicou-se o modelo de regressão linear ajustando-se os dados de tal maneira que cada par ordenado (valor observado TA, valor estimado PCD) estivesse exatamente sobre suas respectivas retas. Assim, para cada equação da forma  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ , aplicando-se os valores de  $y$  (valores obtidos das PCDs pela aplicação da equação 2), obteve-se novos valores de  $x$  ou  $x'$ .

Em seguida verificou-se a relação de  $x$  (valores de velocidades do vento observados nas TAs) com  $x'$  (valores de velocidades do vento estimados nas TAs). Nessa verificação foram quantificados, além dos coeficientes de correlação, os erros através das medidas do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Squared Error* - RMSE), do Erro Absoluto Médio (*Mean Absolute Error* - MAE) e do erro percentual ( $\varepsilon$ ) entre os valores estimados e os observados. As medidas RMSE, MAE e  $\varepsilon$ , são expressas, respectivamente, por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - o_i|}{n} \quad (5)$$

$$\mathcal{E} = 100\% \cdot \frac{p_i - o_i}{o_i} \quad (6)$$

Em que,  $p_i$  representa o valor estimado ou previsto;  $o_i$  representa o valor observado ou medido e  $n$  indica o número de observações.

Segundo (Zacharias, Heatwole e Coakley, 1996) *apud* Carvalheiro (2008) o RMSE mede a variação dos valores estimados ao redor dos valores medidos. Enquanto que o MAE indica o afastamento (desvio) médio absoluto dos valores previstos em relação aos valores observados. Já o  $\varepsilon$  representa o afastamento percentual entre o valor real medido e o inferido. O ideal seria que os valores de MAE, de RMSE e de  $\varepsilon$  fossem o mais próximo de zero.

Para o período de validação aplicou-se a regressão linear, seguindo-se o mesmo procedimento adotado para o período de calibração, ou seja, aplicando-se os valores de  $y$  (valores obtidos das PCDs pela aplicação da equação 2) e obtendo-se  $x'$ . Novamente verificou-se a relação de  $x$  (valores de velocidades do vento observados nas TAs) com  $x'$  (valores de velocidades do vento estimados nas TAs). Nessa verificação foram calculados os novos erros e os novos valores dos coeficientes de correlação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados para a região de Paracuru

#### 4.1.1 Caracterização do regime de ventos na região de Paracuru

As Figuras 5 e 6 mostram respectivamente o perfil diário e mensal da velocidade média do vento, a partir de dados coletados na PCD de São Gonçalo do Amarante (SGA).

Em relação ao perfil de velocidade média diária do vento na região de SGA observa-se que durante o período diurno, compreendido entre 06:00 e 18:00 horário local, tem-se os maiores valores de velocidade média do vento, com ocorrência de valor máximo de 6,3 m/s, aproximadamente às 15:00h horário local. Essa maior intensidade nas velocidades médias do vento no período diurno pode ser explicada pela presença de brisas marítimas, conforme exposto por Barreto, Aragão e Braga (2002) e por Molion e Bernardo (2000).

Para o perfil de velocidade média mensal do vento, tem-se que os maiores valores de velocidade média ocorrem no período de julho a dezembro, coincidindo com a estação seca da região. Adicionalmente, têm-se os menores valores de velocidade média do vento no período de janeiro a maio, período de estação chuvosa da região, confirmando os resultados de Sacramento et al. (2006).

Considerando-se que os mais recentes geradores eólicos instalados no Estado do Ceará, modelo E 70 1.8 da fabricante Wobben (fonte: Wobben Windpower), possuem em sua curva de potência, uma velocidade de entrada - velocidade na qual se tem o início da geração - de 2,5 m/s, evidencia-se que os valores de velocidade média do vento mostrados nos perfis diários e mensais são significativamente favoráveis à produção de energia eólica, uma vez que os mesmos estão, em sua maioria, acima desse valor de entrada, indicado nas figuras abaixo pela linha seccionada vermelha.

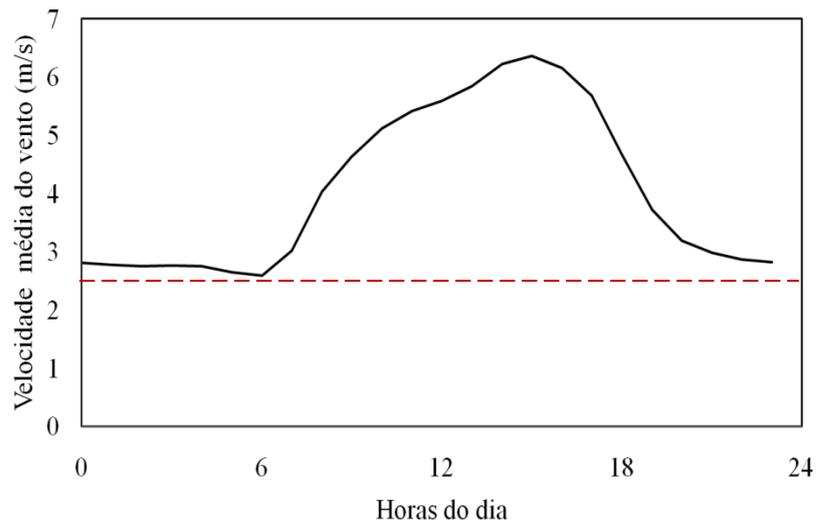


FIGURA 5 - Perfil diário da velocidade do vento na PCD de São Gonçalo do Amarante.

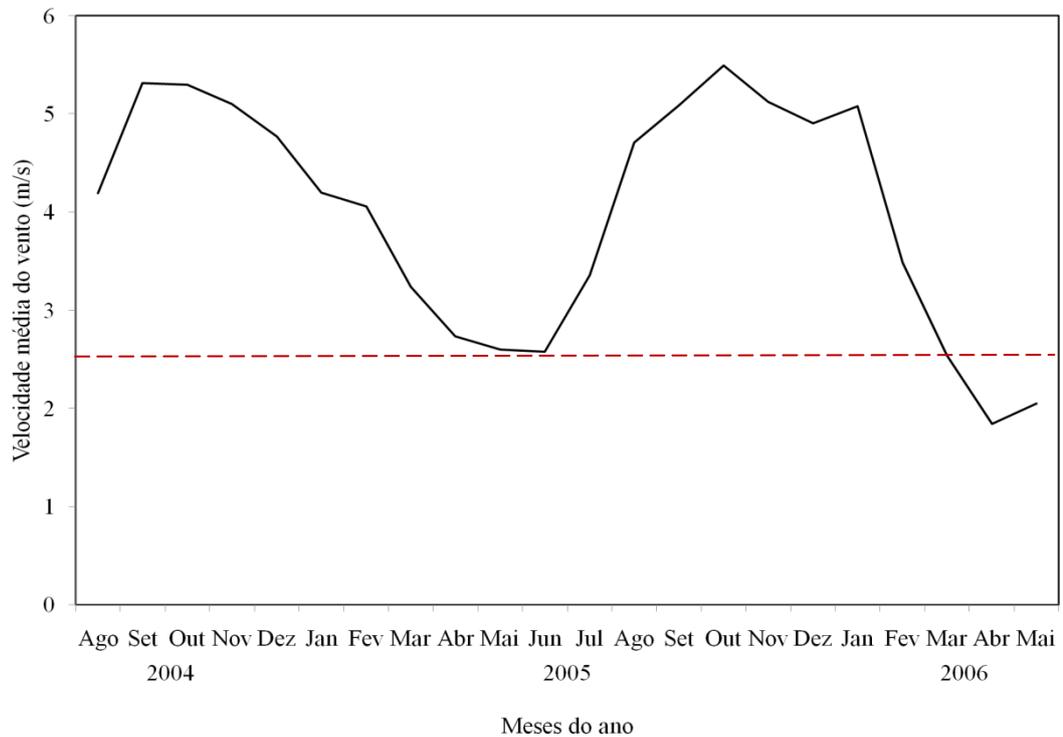


FIGURA 6 - Médias mensais da velocidade do vento na PCD de São Gonçalo do Amarante.

As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, o perfil diário e mensal de velocidade média do vento na TA de Paracuru a partir dos dados coletados em altitude. Os resultados mostram que, em altitude, têm-se maiores velocidades médias do vento, se comparadas com os dados da PCD de SGA. Para o perfil diário de velocidade média do vento, observa-se o ciclo diurno bem estabelecido, assim como na PCD de

SGA, com ocorrência de valor máximo de velocidade média do vento por volta das 15h horário local.

Para o perfil mensal, os períodos onde se tem os maiores e os menores valores de velocidades médias do vento são semelhantes aos citados para a PCD de SGA, caracterizando, desta forma, a região de Paracuru como um potencial sítio para geração eólica no Estado do Ceará.

As figuras mostram ainda que, em altitude, se tem valores de velocidade média diária do vento que chegam a aproximadamente 10,0 m/s e que os valores médios mensais de velocidade, mesmo no período chuvoso ultrapassam os 4,0 m/s o que credencia a região como potencial sítio de geração de energia eólica.

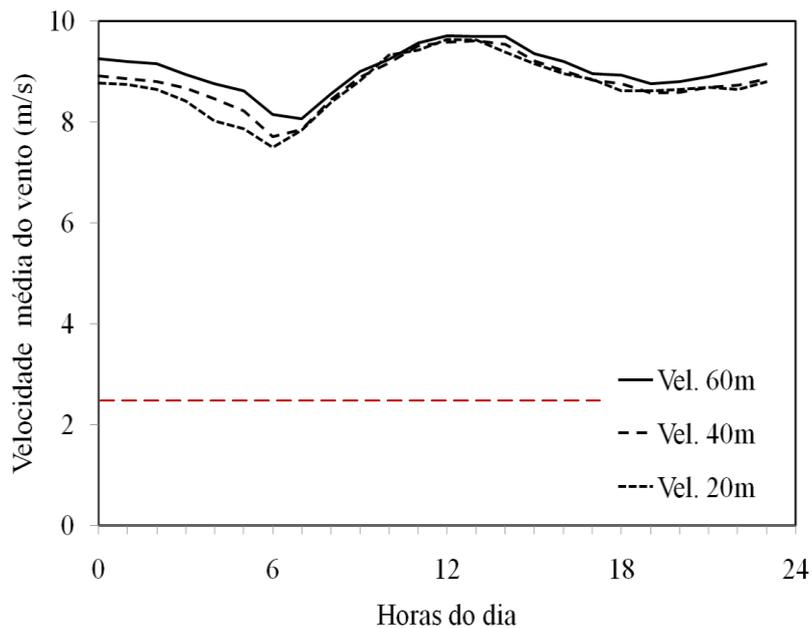


FIGURA 7 - Perfil diário da velocidade do vento na TA de Paracuru.

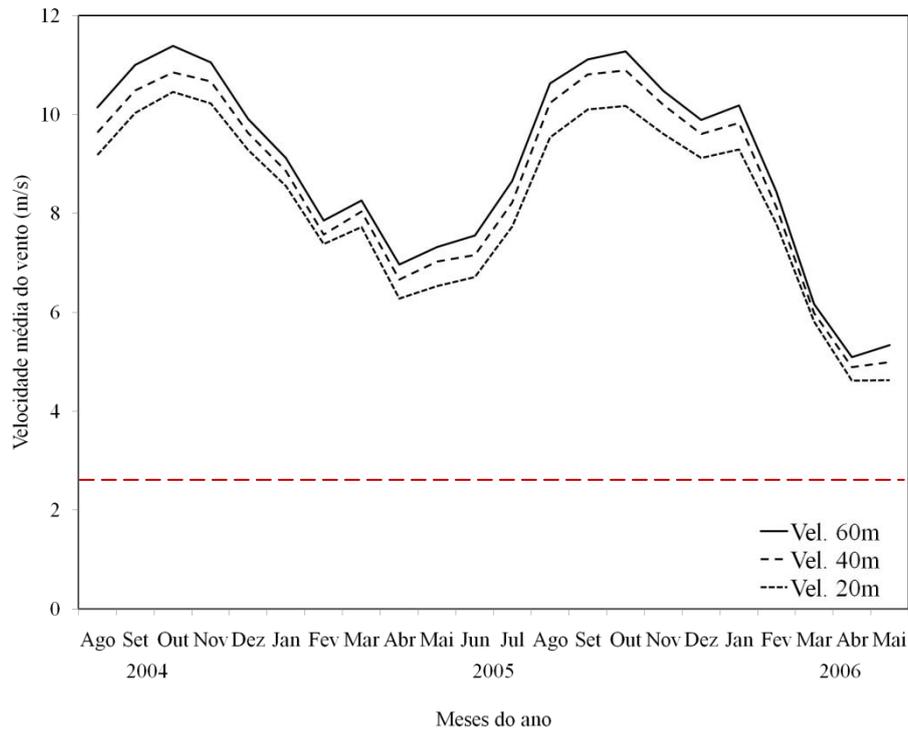


FIGURA 8 - Médias mensais da velocidade do vento na TA de Paracuru.

Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se a direção predominante do vento na região da PCD de SGA e na região da TA de Paracuru, respectivamente.

Observa-se na Figura 9 que a direção predominante do vento na região de SGA é de leste, tendo-se ao longo do ano variações entre as direções sudoeste e nordeste. Na Figura 10, observa-se que a direção predominante do vento em Paracuru é de leste, com variações de entre as direções de sudeste e nordeste ao longo do ano. Assim tem-se evidente a influência dos Ventos Alísios na região, como mencionado em Barreto, Aragão e Braga (2002).

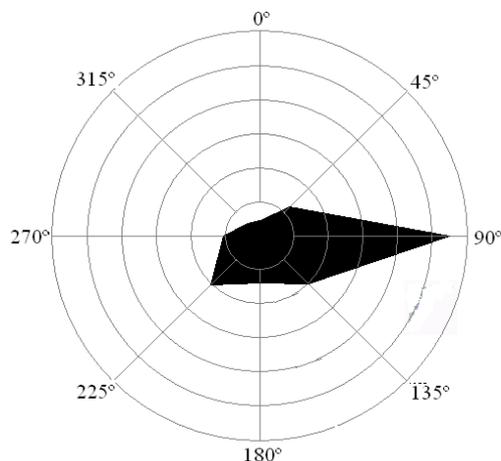


FIGURA 9 - Direção predominante do vento à 10m na PCD de São Gonçalo do Amarante.

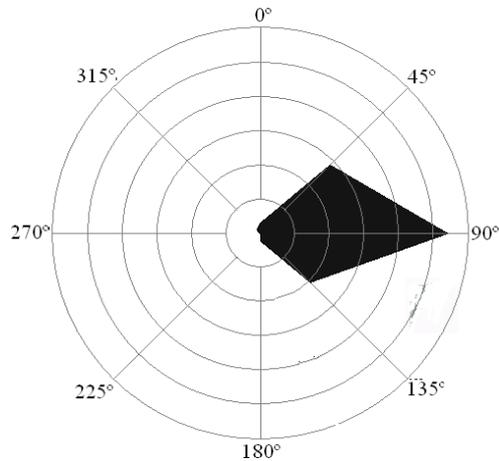


FIGURA 10 - Direção predominante do vento à 60m na TA de Paracuru.

#### 4.1.2 Período de calibração – região de Paracuru

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam as correlações entre os valores de velocidade média do vento estimados para 60, para 40 e para 20 metros, respectivamente, através dos dados observados em superfície na PCD de SGA, e os valores observados na TA de Paracuru.

Em adição, nessas figuras têm-se as equações das retas correspondentes aos ajustes de regressão linear juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para médias diárias, de 5, de 10 e de 15 dias.

As figuras mostram ainda que, na medida em que se aumenta o período de cálculo das médias de velocidade do vento, o coeficiente de determinação aumenta. Assim, na Figura 11, para médias diárias de velocidade do vento (Figura 11a) tem-se o modelo de regressão linear explicando aproximadamente 69% da variabilidade dos dados observados, enquanto que para médias de 15 dias (Figura 11d) o modelo explica aproximadamente 76% dessa variabilidade.

Na Figura 12, observa-se que o modelo de regressão linear explica aproximadamente 70% da variabilidade dos dados observados quando se utilizam médias diárias, sendo que esse percentual chega a valores próximos de 79% para médias de 15 dias (Figura 12d).

Na Figura 13, o modelo de regressão linear explica 74% (Figura 13a) e 84% (Figura 13d) da variabilidade dos dados observados quando o período de cálculo das médias é respectivamente, diário e de 15 dias.

Portanto, o maior índice de coeficiente de determinação ocorre para a altitude de 20 metros, com dados médios de 15 dias (Figura 13d).

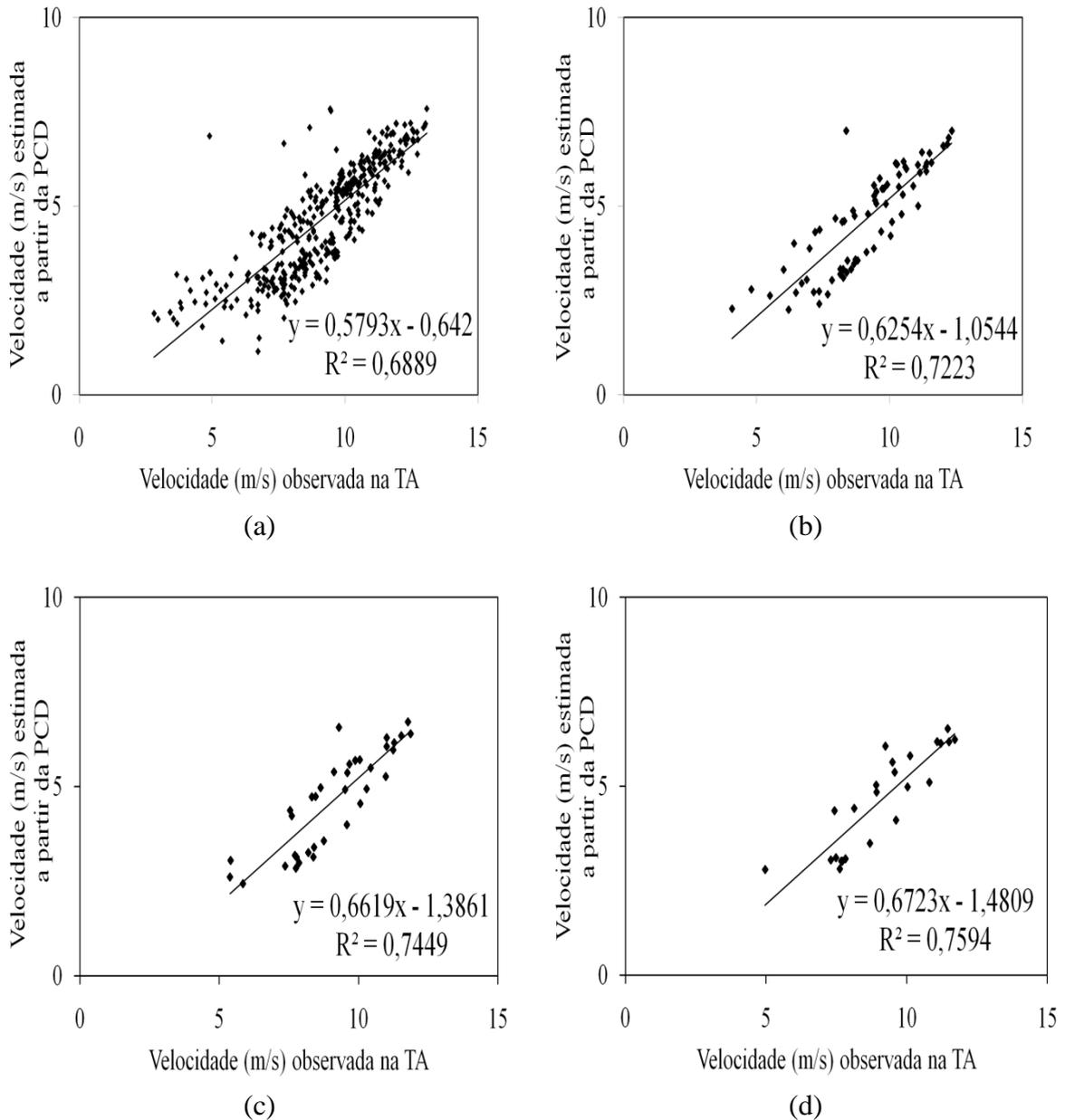


FIGURA 11 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de SGA para 60m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 60m na TA de Paracuru (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 dias (b), de 10 dias (c) e de 15 dias (d).

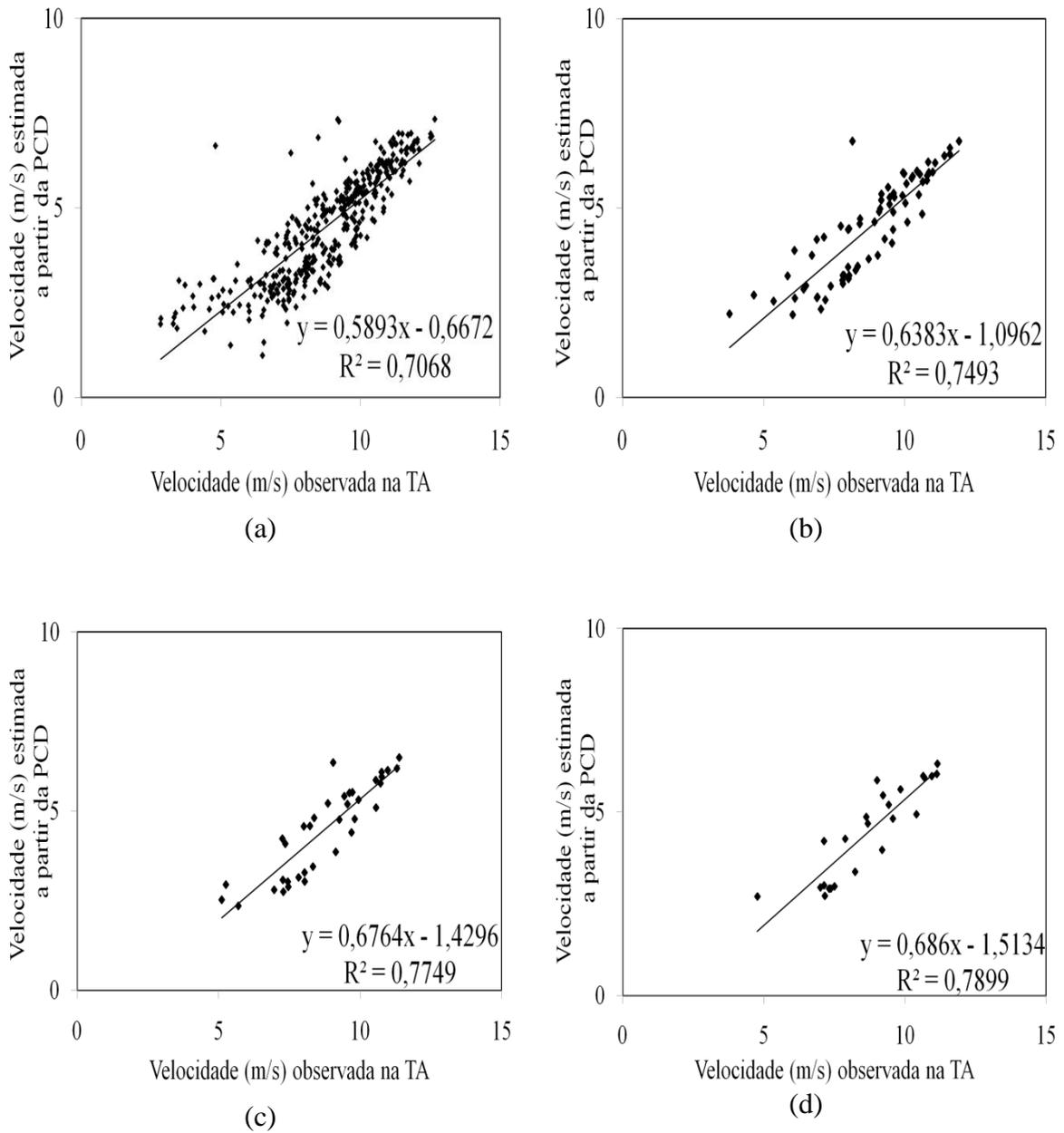


FIGURA 12 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de SGA para 40m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 40m na TA de Paracuru (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 dias (b), de 10 dias (c) e de 15 dias (d).

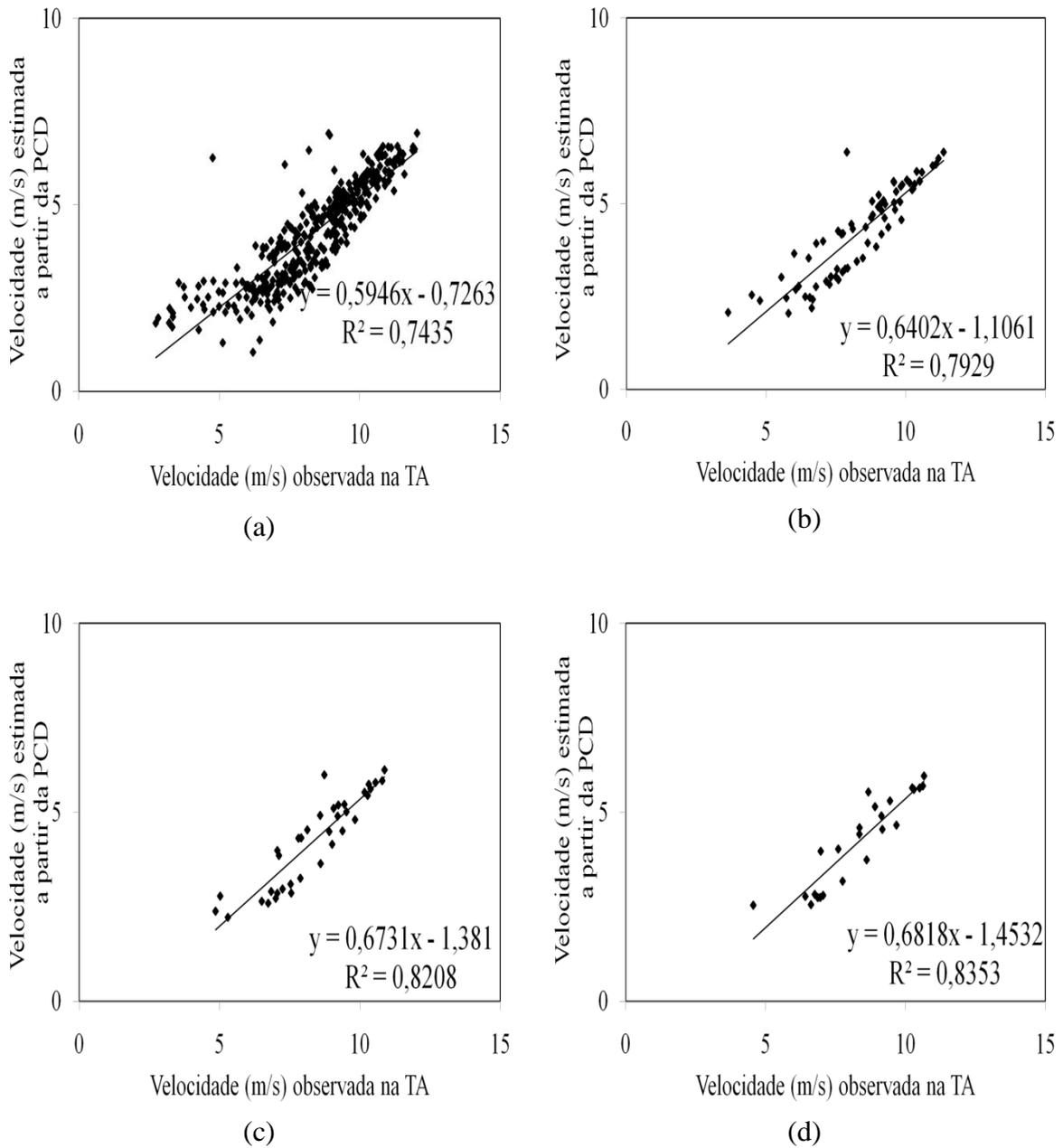


FIGURA 13 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de SGA para 20m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 20m na TA de Paracuru (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 dias (b), de 10 dias (c) e de 15 dias (d).

Após a obtenção das equações das retas que representam o ajuste de regressão linear entre os conjuntos de dados de velocidade do vento, mostrados anteriormente, procedimento denominado calibração, foram obtidos valores estimados por essas retas para as três alturas de medição da TA de Paracuru, e assim, foram comparados com os conjuntos de dados observados na TA, visando investigar o desempenho do modelo de regressão linear em reproduzir a variabilidade da

velocidade média do vento observada na região de Paracuru a partir das velocidades médias estimadas, pelo perfil logarítmico do vento, obtido dos dados de velocidade do vento observados na PCD de SGA.

Na Figura 14 mostra-se a comparação entre as séries de dados estimados pelo método de regressão linear e os observados na TA de Paracuru, para médias diárias, de 5, de 10 e de 15 dias, na altura de 60 metros.

Nessa figura observa-se uma concordância entre os valores de velocidades médias estimadas e observadas em todos os períodos de cálculo de médias investigados. Em geral, a série de dados obtidos pelo modelo de regressão linear superestima a série dos dados observados, na estação seca, e subestima na estação chuvosa. Essa observação fica mais evidente quando se aumenta o período de cálculo das médias de velocidades do vento.

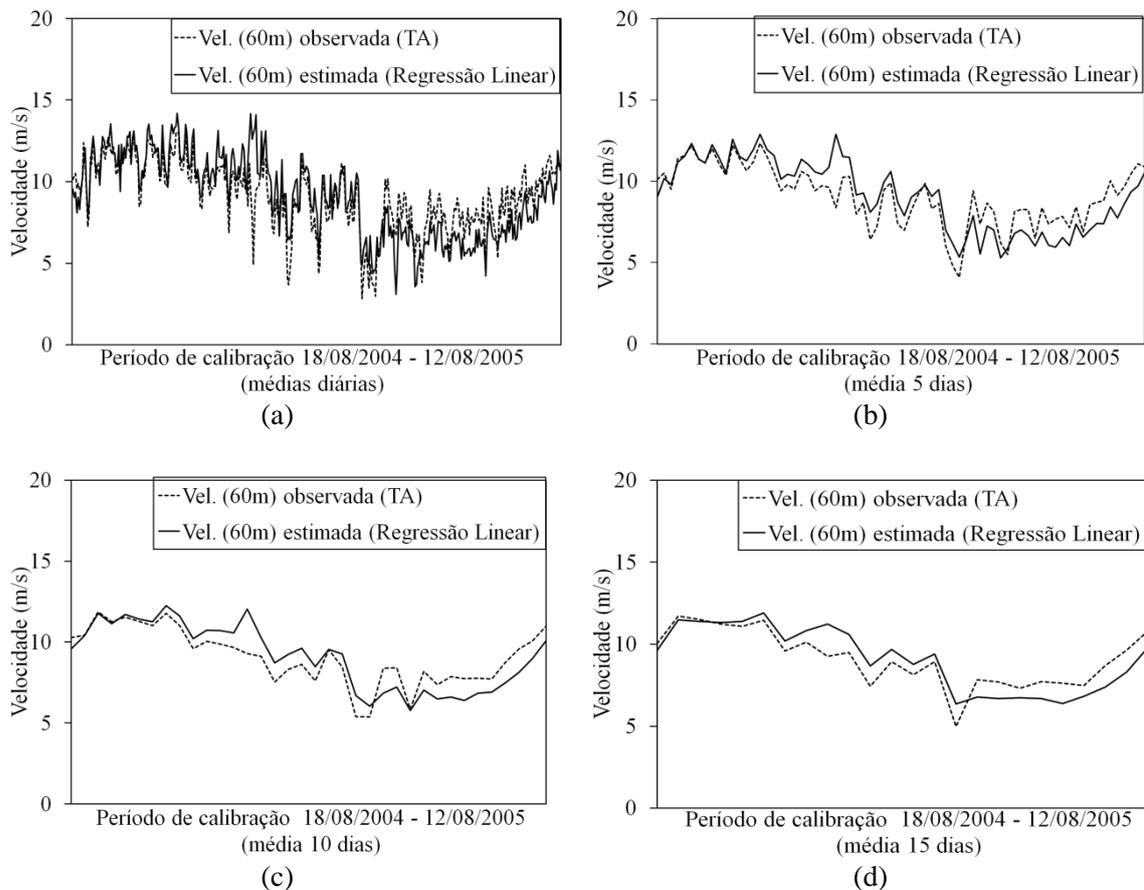


FIGURA 14 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 60 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

Na Figuras 15 tem-se a comparação entre as séries de dados estimados pelo método de regressão linear e os observados na TA de Paracuru, para médias diárias, de 5, de 10 e de 15 dias, na altura de 40 metros.

Os resultados apontam, novamente, períodos de subestimativa e superestimativa semelhantes aos citados na comparação anterior, para o caso de 60 metros de altura.

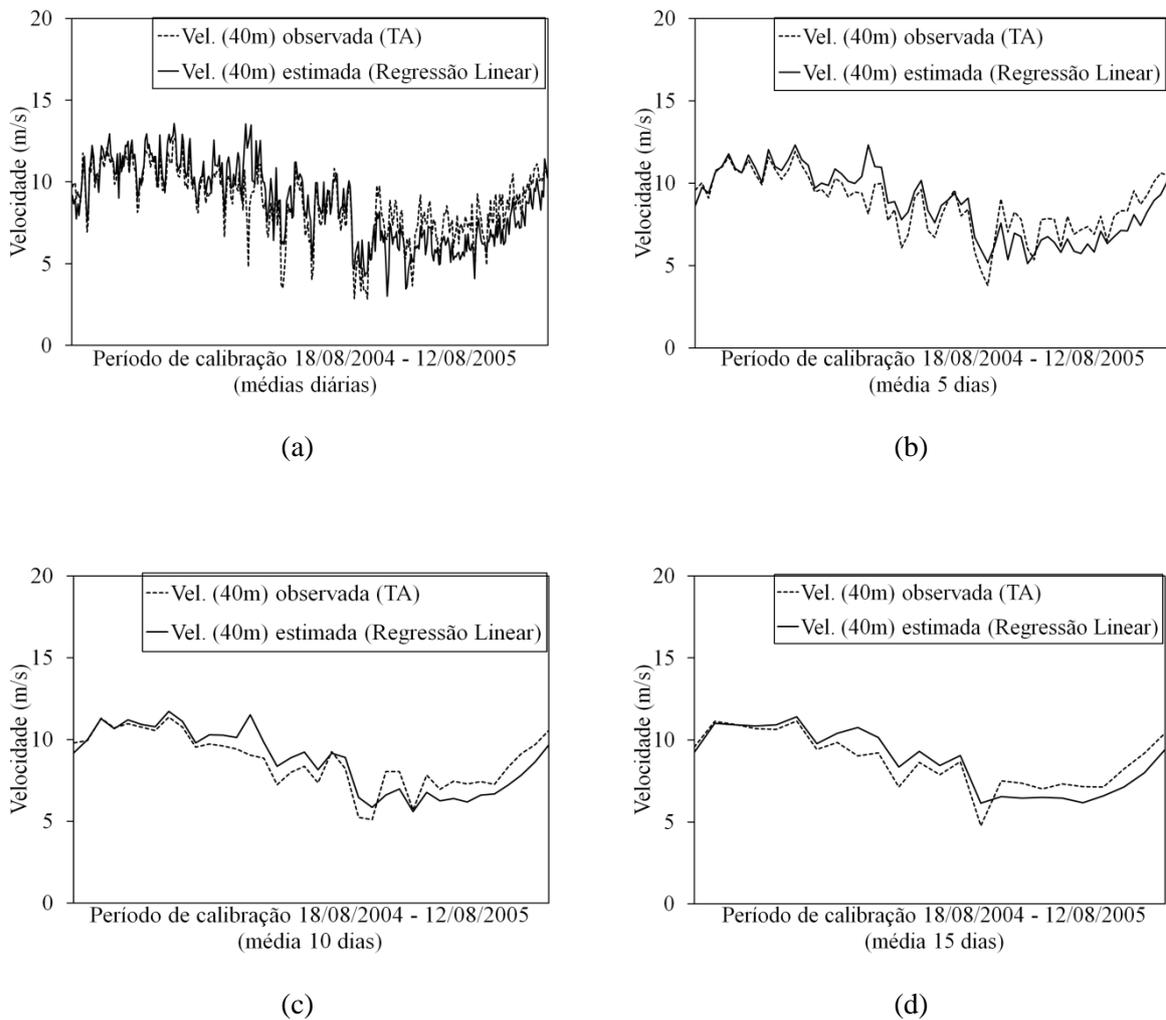


FIGURA 15 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 40 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

A Figura 16 mostra a comparação entre as séries de dados estimados pelo método de regressão linear e os observados na TA de Paracuru, para médias diárias, de 5, de 10 e de 15 dias, na altura de 20 metros.

Nessa comparação, tem-se também superestimativas dos valores observados, no período seco e subestimativa no período chuvoso, concordando com as outras duas situações mostradas anteriormente, para 60 e 40 metros.

Essa característica, encontrada nessas comparações, se deve ao fato de que as séries de dados de velocidades do vento observado (TA), mostradas nas figuras 4.3 e 4.4 terem comportamentos de variabilidade temporal semelhantes, diferindo apenas nos valores, que em 60 metros são maiores que em 40 metros, que por sua vez são maiores que os valores em 20 metros.

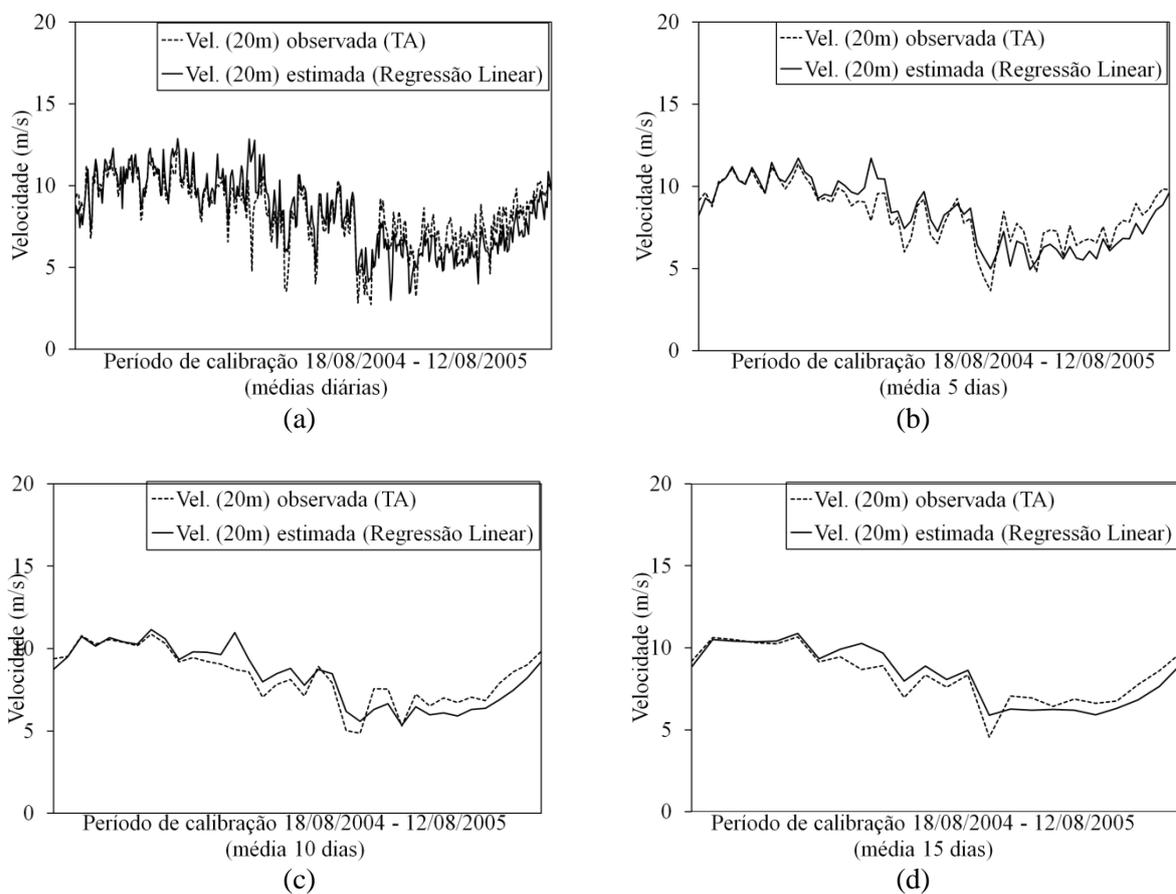


FIGURA 16 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 20 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

A fim de se avaliar o grau de ajuste entre as séries de dados estimados e observados, no período de calibração, foram obtidos o Erro Médio Quadrático (RMSE), o Erro Absoluto Médio (MAE) e o erro percentual ( $\varepsilon$ ), bem como o

coeficiente de correlação( $r$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), mostrados na Tabela 1 abaixo.

Na tabela observam-se, em geral, que quanto menores são os erros, maiores são os coeficientes correlação e, conseqüentemente, os coeficientes de determinação. Essa é uma característica importante, já que segundo Devore (2006), tem-se uma correlação forte se  $0,8 \leq |r| \leq 1,0$ .

Para as estimativas a 20 metros de altura os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,70 m/s, 0,58 m/s e 0,02%. Os dois primeiros ocorreram para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias e o último ocorreu para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 5 e de 10 dias. Ainda nessa altitude o coeficiente máximo de correlação foi de 0,91 e o coeficiente máximo de determinação explica 83% da variabilidade dos dados observados.

Para as estimativas a 40 metros os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,83 m/s, 0,71 m/s e 0,01%, todos registrados para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias, onde se tem também o coeficiente máximo de correlação, da ordem de 0,89, e o valor do coeficiente máximo de determinação explica 79% da variabilidade dos dados observados.

Em 60 metros, as estimativas mostram que os menores valores dos erros foram respectivamente, 0,94 m/s, 0,82 m/s e 0,02%, todos registrados para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias, em que se tem também o coeficiente máximo de correlação de 0,87 e o coeficiente máximo de determinação explica 76% da variabilidade dos dados observados.

TABELA 1 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados pelas equações das retas de regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru no período de calibração.

<b>Altura (m)</b>	<b>Períodos nos quais se obteve as médias das velocidades do vento</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>MAE (m/s)</b>	<b><math>\epsilon</math> (%)</b>	<b>r</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>20 m</b>	Diárias	1,12	0,86	0,10	0,86	0,74
	5 dias	0,87	0,68	0,02	0,89	0,79
	10 dias	0,75	0,60	0,02	0,91	0,83
	15 dias	0,70	0,58	0,11	0,91	0,83
<b>40 m</b>	Diárias	1,29	1,01	0,04	0,84	0,71
	5 dias	1,02	0,82	0,04	0,87	0,76
	10 dias	0,88	0,73	0,05	0,88	0,77
	15 dias	0,83	0,71	0,01	0,89	0,79
<b>60 m</b>	Diárias	1,39	1,10	0,06	0,83	0,69
	5 dias	1,13	0,92	0,06	0,85	0,72
	10 dias	0,99	0,84	0,13	0,86	0,74
	15 dias	0,94	0,82	0,02	0,87	0,76

Para se verificar o ajuste dos dados estimados aos observados, utilizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (2003). O ajuste mostrou-se significativo ao nível de 95% de significância.

#### 4.1.3 Período de validação – região de Paracuru

Nesta seção serão descritos os resultados referentes ao período de validação a fim de se investigar se o modelo de regressão linear apresenta desempenho satisfatório para previsão dos valores médios da velocidade do vento na região de Paracuru.

Na Figura 17 têm-se a comparação entre as séries de dados estimados pelo método de regressão linear e os observados na TA de Paracuru, para médias diárias, de 5, de 10 e de 15 dias, na altura de 60 metros, para o período de validação.

Nesta figura verifica-se que, entre a série de dados estimados e a série de dados observados na TA de Paracuru, existe uma concordância ao longo de todo o período de validação, no qual predomina, em geral, a superestimativa dos dados obtidos pela regressão linear em relação aos dados observados na TA. Essa superestimativa concorda com os resultados encontrados no período de calibração quando se considera o mesmo intervalo de tempo das séries de dados, agosto de um ano a maio do ano seguinte, que corresponde ao período seco dessa região.

Essa característica de comparação fica mais evidente quando se aumento o período de cálculo das médias das velocidades do vento.

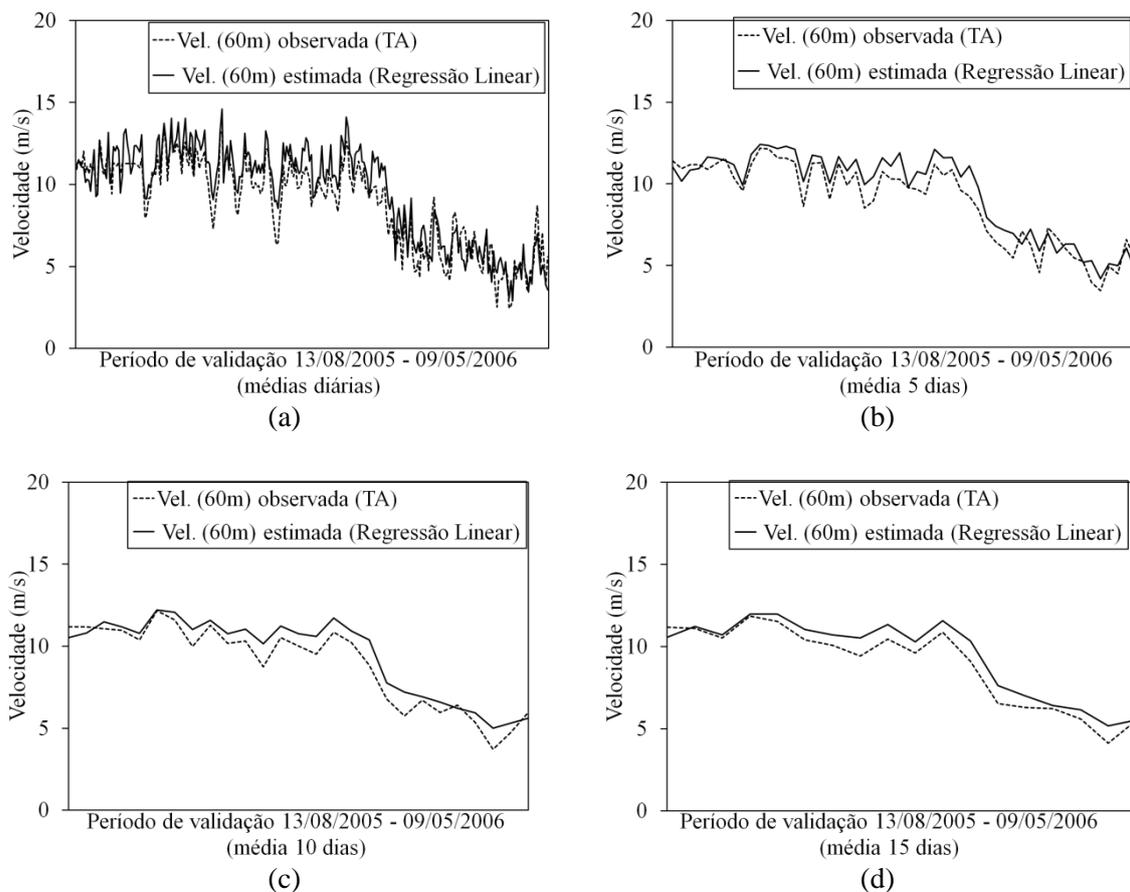


FIGURA 17 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 60 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

A Figura 18 mostra a comparação entre as séries de dados obtidos pelo método de regressão linear e os observados na TA de Paracuru, para médias diárias, de 5 dias, de 10 dias e de 15 dias, na altura de 40 metros, no período em estudo.

Analisando-se essas figuras, verifica-se, em geral, a existência de uma superestimativa dos dados obtidos pela regressão linear em relação aos dados observados na TA, característica também encontrada no período de calibração para o mesmo intervalo de tempo (agosto a maio). E assim como na análise anterior (para altura de 60 metros) essa característica é mais evidente quando se aumenta o intervalo das médias de velocidade do vento.

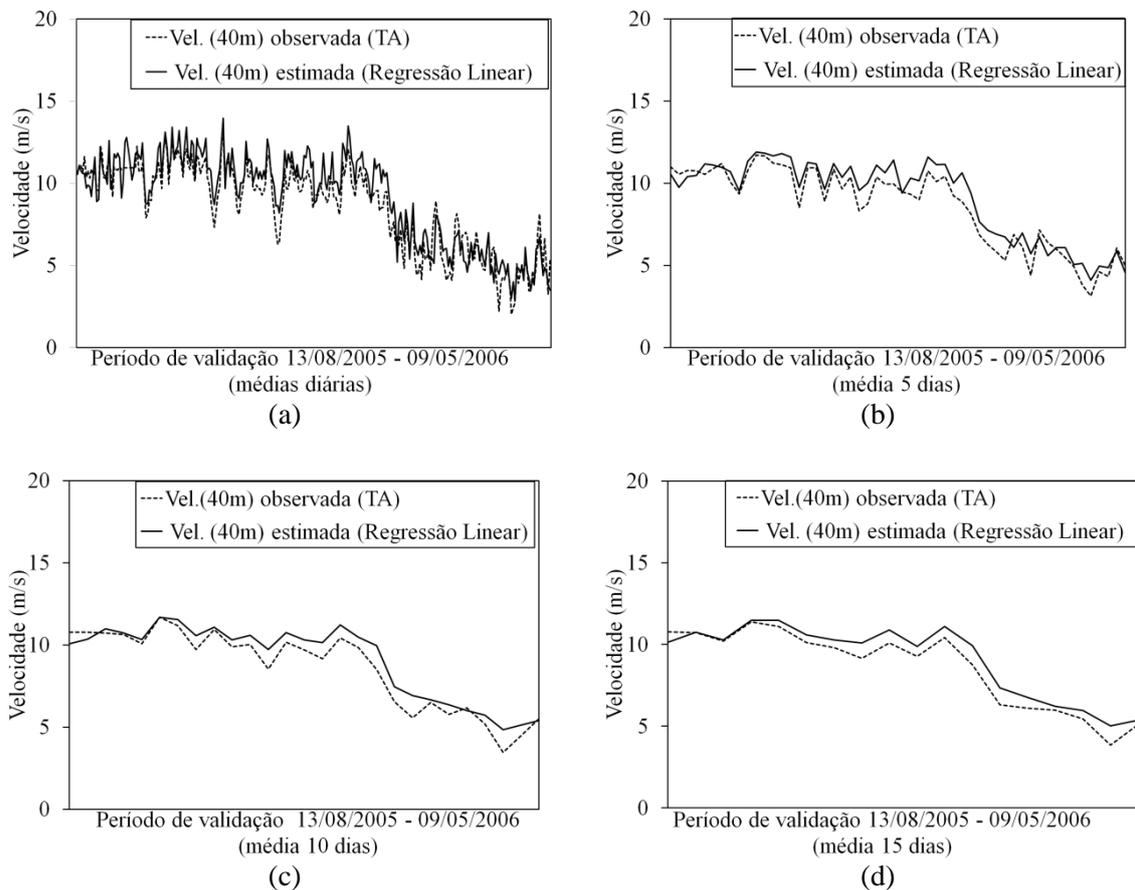


FIGURA 18 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 40 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

São mostradas na Figuras de 19 as comparações entre as séries de dados estimados e os observados na TA de Paracuru, para os mesmos intervalos de médias, na altura de 20 metros, no período de validação.

Assim, pode-se observar que, em geral, também ocorre a superestimativa da série de dados obtidos pela regressão em relação aos observados na TA, observada no mesmo intervalo de tempo no período de calibração, assim como se verifica nas comparações anteriores.

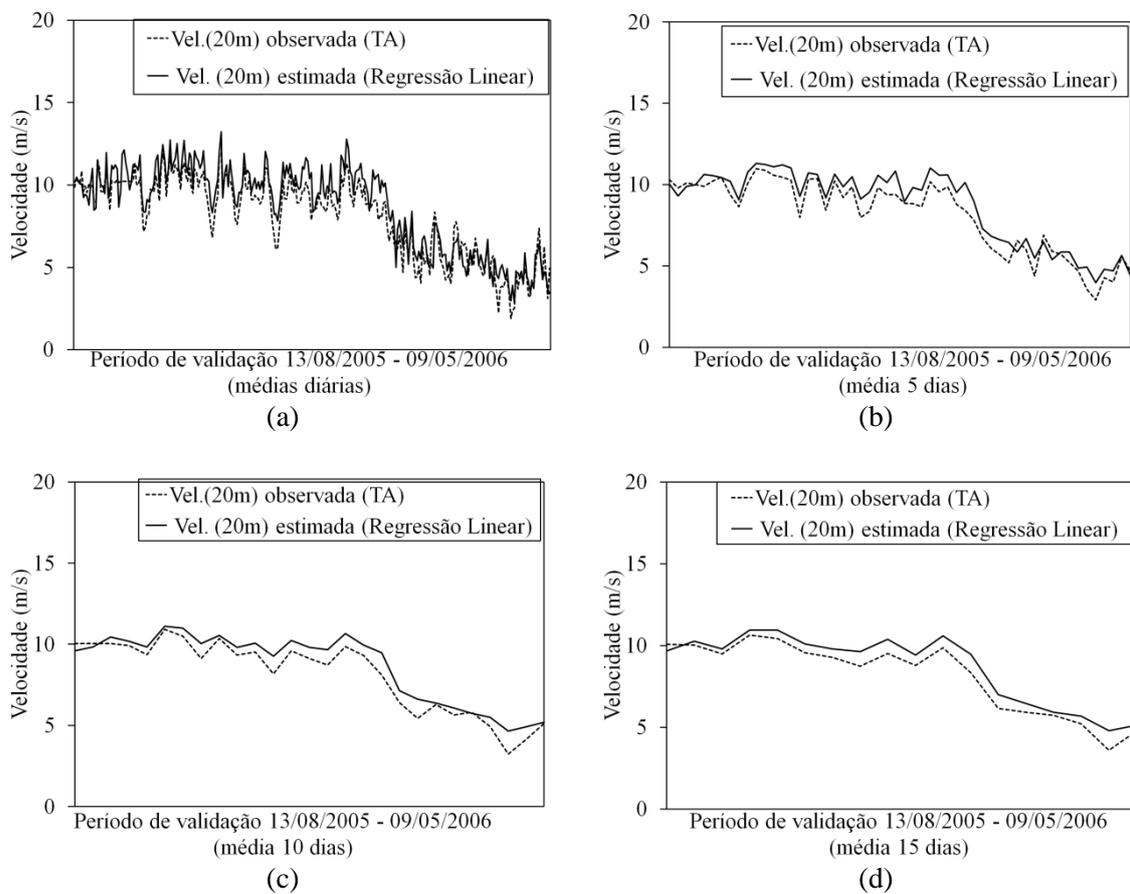


FIGURA 19 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Paracuru para a altura de 20 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

Assim como procedeu-se no período de calibração, a fim de se avaliar o grau de ajuste entre os dados observados e estimados, no período de validação, também foram quantificados os erros RMSE, MAE e  $\varepsilon$ . Calcularam-se também os coeficientes de correlação e determinação entre os dois conjuntos de dados. Os resultados dessas quantificações são mostrados na Tabela 2.

Para 20 metros, observa-se que os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,66 m/s, 0,59 m/s e 6,3% nas comparações entre os valores médios de 15 dias.

Ainda nessa altitude o coeficiente máximo de correlação foi de 0,99 para médias de 15 dias e o coeficiente máximo de determinação explica 98% da variabilidade dos dados observados.

Em 40 metros, os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,66 m/s, 0,56 m/s e 5,3%, todos registrados nas comparações entre os valores médios de 15 dias, em que o coeficiente de correlação foi máximo (0,98) e o coeficiente de determinação indica que 96% da variabilidade dos dados observados foi capturada.

Para 60 metros, os menores valores dos erros acima citados foram respectivamente, 0,72 m/s, 0,62 m/s e 5,8%, todos registrados nas comparações entre os valores médios de 15 dias, onde se tem também o coeficiente máximo de correlação observado (0,98) e o coeficiente máximo de determinação que explica 96% da variabilidade dados observados.

Tanto para o período de calibração quanto para o de validação os valores de RMSE e MAE são inferiores aos erros encontrados por Santiago de Maria (2006), quando o mesmo comparou os valores de velocidade média do vento observados na TA de Paracuru com os valores simulados com o RAMS a 20, 40 e 60 metros. Adicionalmente, os valores dos coeficientes de correlação aqui apresentados em ambos os períodos são superiores aos valores encontrados pelo autor acima citado.

TABELA 2 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados na TA pelas equações das retas de regressão e os dados observados na TA no período de validação para a região de Paracuru.

<b>Altura (m)</b>	<b>Períodos nos quais se obteve as médias das velocidades do vento</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>MAE (m/s)</b>	<b><math>\varepsilon</math> (%)</b>	<b>r</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>20 m</b>	Diárias	1,02	0,85	6,8	0,95	0,90
	5 dias	0,77	0,67	6,4	0,97	0,94
	10 dias	0,70	0,60	6,3	0,98	0,96
	15 dias	0,66	0,59	6,3	0,99	0,98
<b>40 m</b>	Diárias	1,07	0,89	5,9	0,94	0,88
	5 dias	0,80	0,69	5,6	0,97	0,94
	10 dias	0,72	0,60	5,4	0,98	0,96
	15 dias	0,66	0,56	5,3	0,98	0,96
<b>60 m</b>	Diárias	1,17	0,99	6,6	0,94	0,88
	5 dias	0,88	0,77	6,1	0,97	0,94
	10 dias	0,79	0,68	6,0	0,97	0,94
	15 dias	0,72	0,62	5,8	0,98	0,96

Vale ressaltar que, como para o período de calibração, realizou-se um teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (2003) que visa investigar o ajuste dos dados estimados aos observados. Os resultados obtidos apontam um nível de significância de 95% entre essas séries de dados.

## 4.2 Resultados para a região de Camocim

### 4.2.1 Caracterização do regime de ventos na região de Camocim

As Figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, o perfil médio diário e mensal da velocidade do vento, a partir de dados coletados na PCD de Barroquinha (BAR).

Em relação ao perfil de velocidade média diária do vento na região de BAR, observa-se que os maiores valores de velocidade média do vento ocorrem no período diurno, compreendido entre 06:00h e 18:00h horário local, com valor máximo de 6,2 m/s registrado por volta de 14:00h horário local. Estes resultados estão diretamente ligados à presença de brisas marítimas, como já foi exposto nos estudos de Molion e Bernardo (2000) e de Barreto, Aragão e Bernardo (2002).

Já para o perfil de velocidade média mensal do vento, no período compreendido entre os meses de agosto e dezembro, se verificam os maiores valores de velocidade média do vento. Assim como na região de Paracuru, esse período coincide com a estação seca da região. Por outro lado, os menores valores são observados no período de estação chuvosa da região, mais precisamente entre os meses de fevereiro a maio.

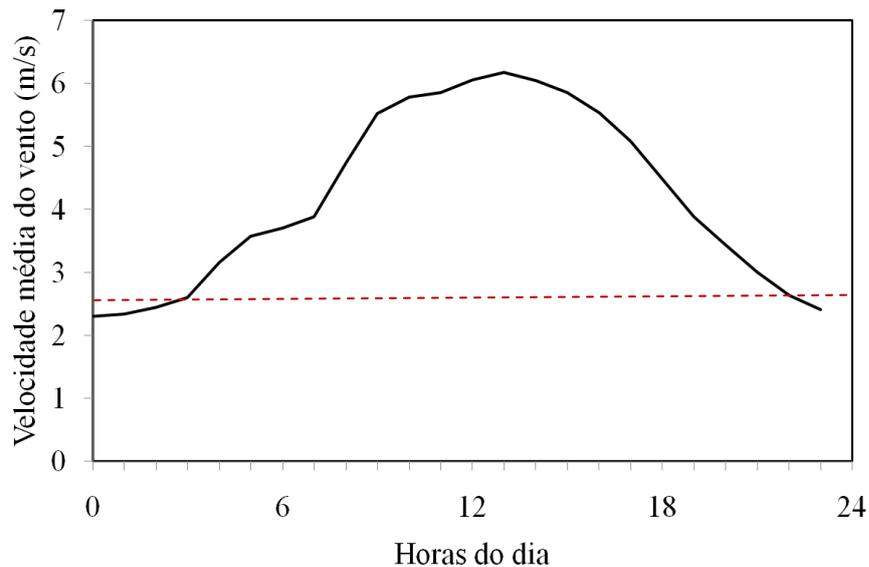


FIGURA 20 - Perfil diário da velocidade do vento na PCD de Barroquinha.

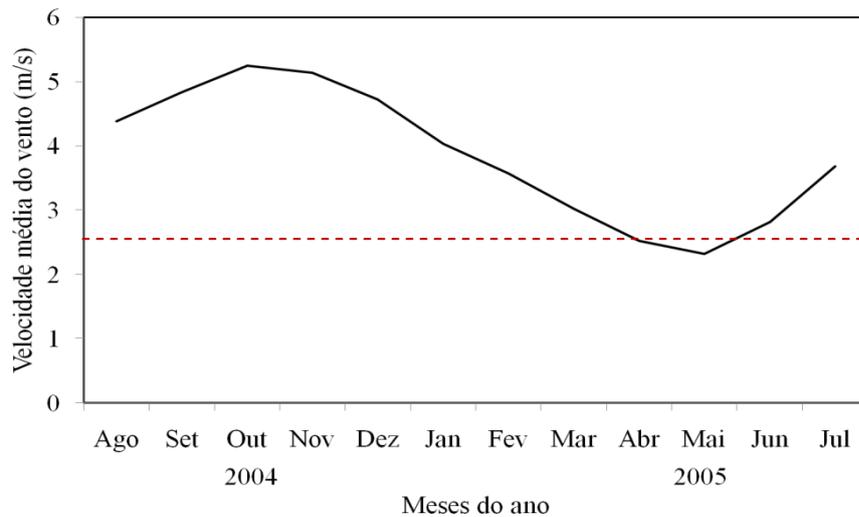


FIGURA 21- Médias mensais da velocidade do vento na PCD de Barroquinha.

As Figuras 22 e 23 mostram, respectivamente, o perfil médio diário e mensal da velocidade do vento na TA de Camocim.

Para o perfil diário de velocidade média do vento, observa-se a ocorrência dos maiores valores de velocidade média do vento, aproximadamente da ordem de 12,0 m/s, em torno da 17:00h horário local.

Considerando-se o perfil mensal de velocidade média, o período onde verifica-se os maiores índices de velocidade média do vento coincide com o mesmo período de ocorrência na PCD de BAR, ou seja, de agosto a dezembro, estação seca da região. O período onde se tem os menores índices de velocidade média do vento também é similar ao da PCD de BAR, ou seja de fevereiro a maio, coincidindo com a estação chuvosa da região. Observa-se ainda que todos os valores médios mensais, ainda que no período chuvoso, estão acima de 3,5 m/s.

Ressalta-se que, para efeito de produção de energia eólica, a região de Camocim também apresenta-se como um potencial sítio para o aproveitamento deste tipo de energia. Uma constatação dessa potencialidade é o fato de que os dados apresentados tanto no perfil diário quanto no perfil mensal de velocidade média do vento apresentam-se em sua maioria acima da velocidade de entrada dos

aerogeradores, que é de 2,5 m/s, valor esse representado nas figuras pela linha seccionada vermelha.

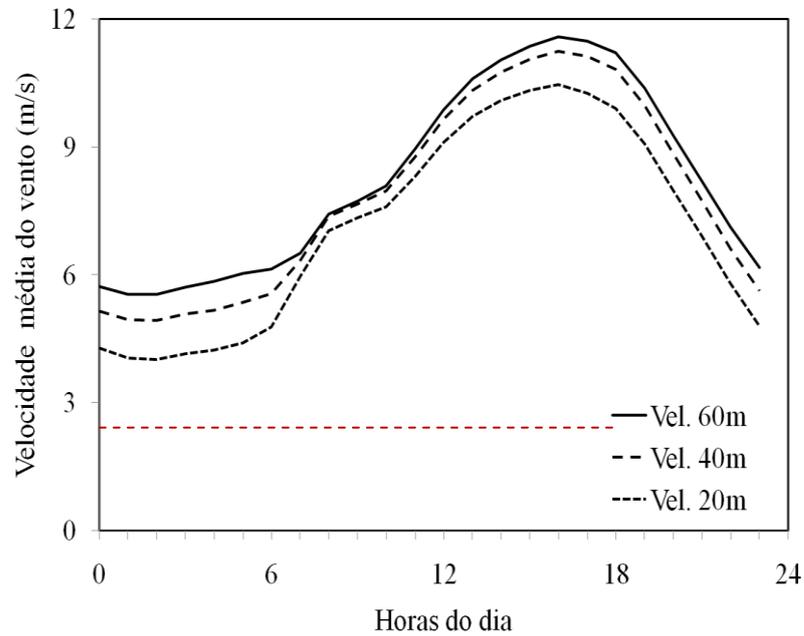


FIGURA 22 - Perfil diário da velocidade do vento na TA de Camocim.

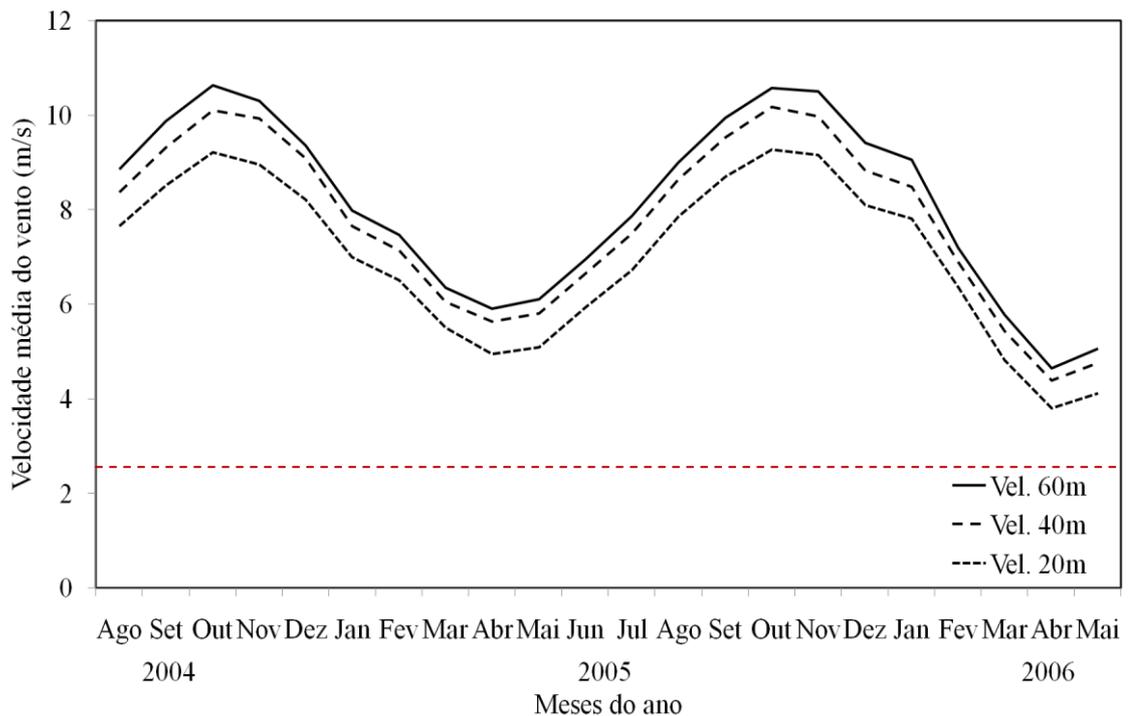


FIGURA 23 - Médias mensais da velocidade do vento na TA de Camocim.

As Figuras 24 e 25 apresentam a direção predominante do vento na PCD de BAR e a direção predominante do vento na TA de Camocim.

Observa-se que tanto na região de BAR quanto na região de Camocim a direção predominante do vento é de leste, com variações ao longo do ano entre as direções de nordeste e sudoeste. Essas observações também evidenciam a influência dos Ventos Alísios conforme exposto por Barreto, Aragão e Braga (2002).

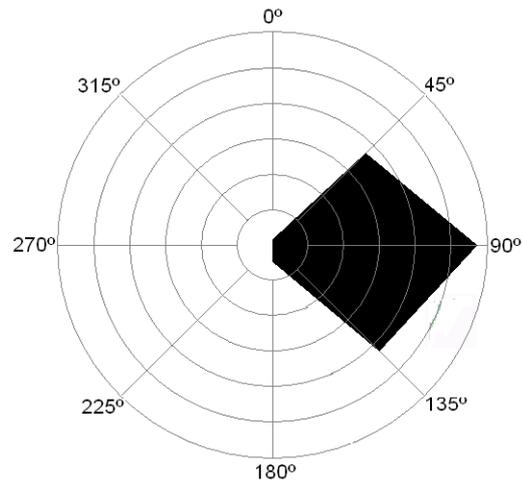


FIGURA 24 - Direção predominante do vento à 10m na PCD de Barroquinha.

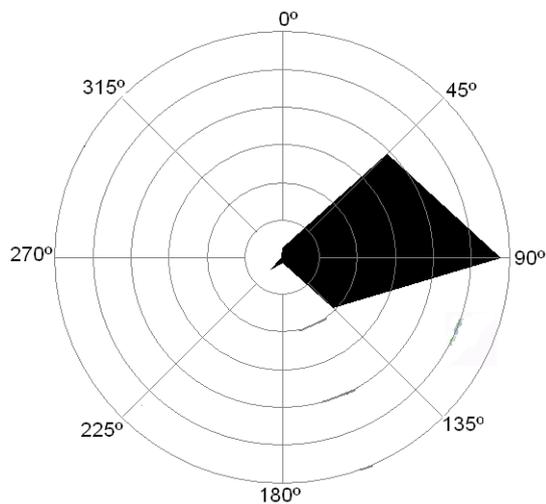


FIGURA 25 - Direção predominante do vento à 60m na TA de Camocim.

#### 4.2.2 Período de calibração – região de Camocim

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam as correlações entre os valores de velocidade média do vento estimados para 60, 40 e 20 metros, respectivamente,

através dos dados observados em superfície na PCD de BAR, e os valores observados na TA de Camocim.

Em adição, nessas figuras têm-se as equações das retas correspondentes aos ajustes de regressão linear juntamente com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para médias diárias, de 5, de 10 e de 15 dias.

As figuras também mostram que, assim como ocorre para a região de Paracuru, na medida em que se aumenta o período de cálculo das médias de velocidade do vento, o coeficiente de determinação aumenta. Assim, na Figura 26, onde foram realizadas análises para a altura de 60 metros, para médias diárias de velocidade do vento (Figura 26a), tem-se o modelo de regressão linear explicando aproximadamente 82% da variabilidade dos dados observados, enquanto que para médias de 15 dias (Figura 26d) o modelo explica aproximadamente 93% dessa variabilidade.

Na Figura 27, que mostra os resultados obtidos para 40 metros, observa-se que, enquanto para médias diárias (Figura 27a) o modelo de regressão linear explica 82% da variabilidade dos dados observados, tem-se para médias de 15 dias (Figura 27d) o modelo explicando 94% dessa variabilidade.

Para 20 metros de altura, os resultados obtidos são mostrados na Figura 28. Observa-se que, para médias diárias (Figura 28a) e médias de 15 dias (Figura 28d), o modelo de regressão linear explica, respectivamente, 83% e 95% da variabilidade dos dados observados.

Portanto, com já ocorrera para a região de Paracuru, o maior índice de coeficiente de determinação ocorre para a altitude de 20 metros, para o período de cálculo das médias de 15 dias (Figura 28d).

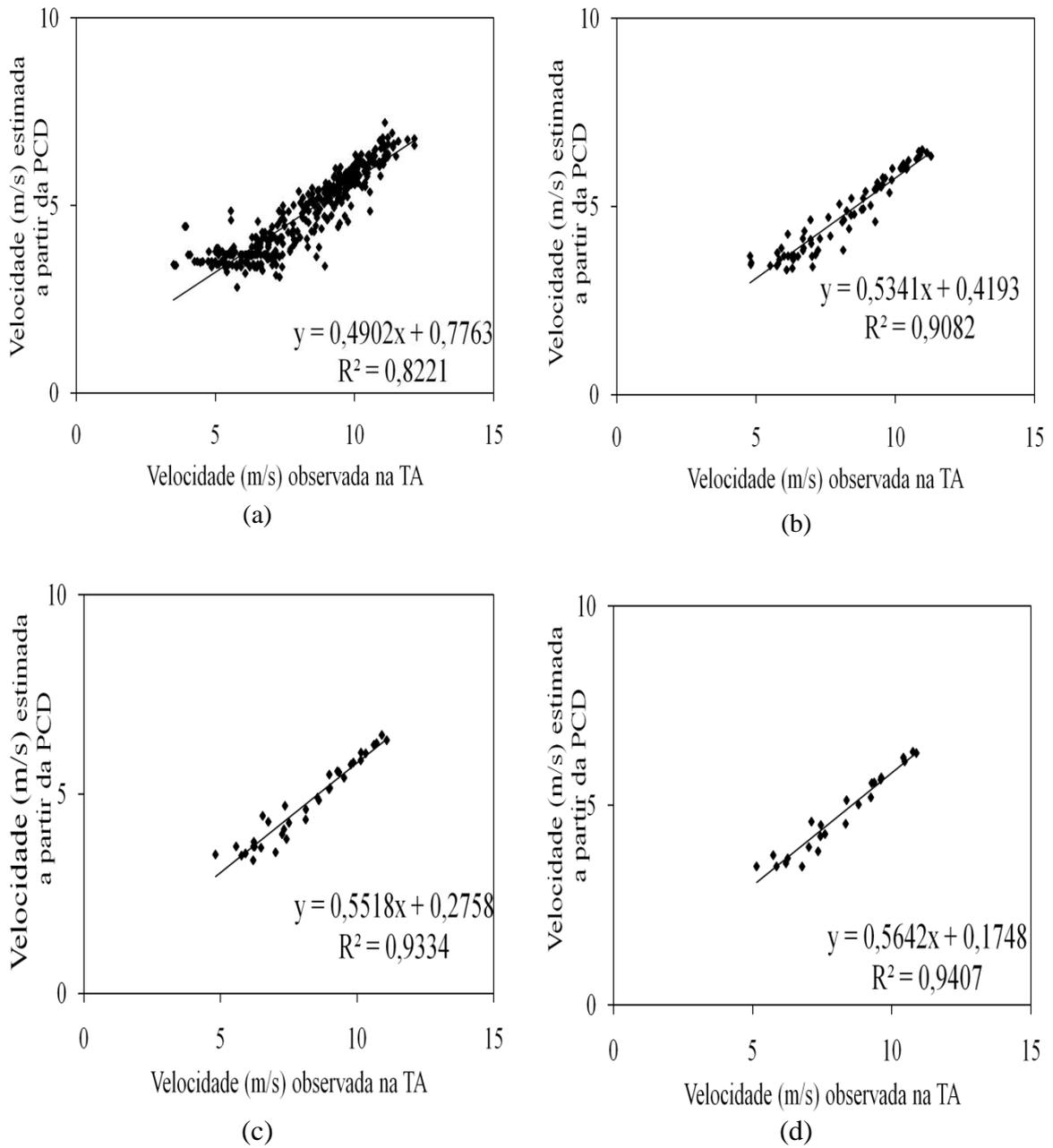


FIGURA 26 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de BAR para 60m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 60m na TA de Camocim (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

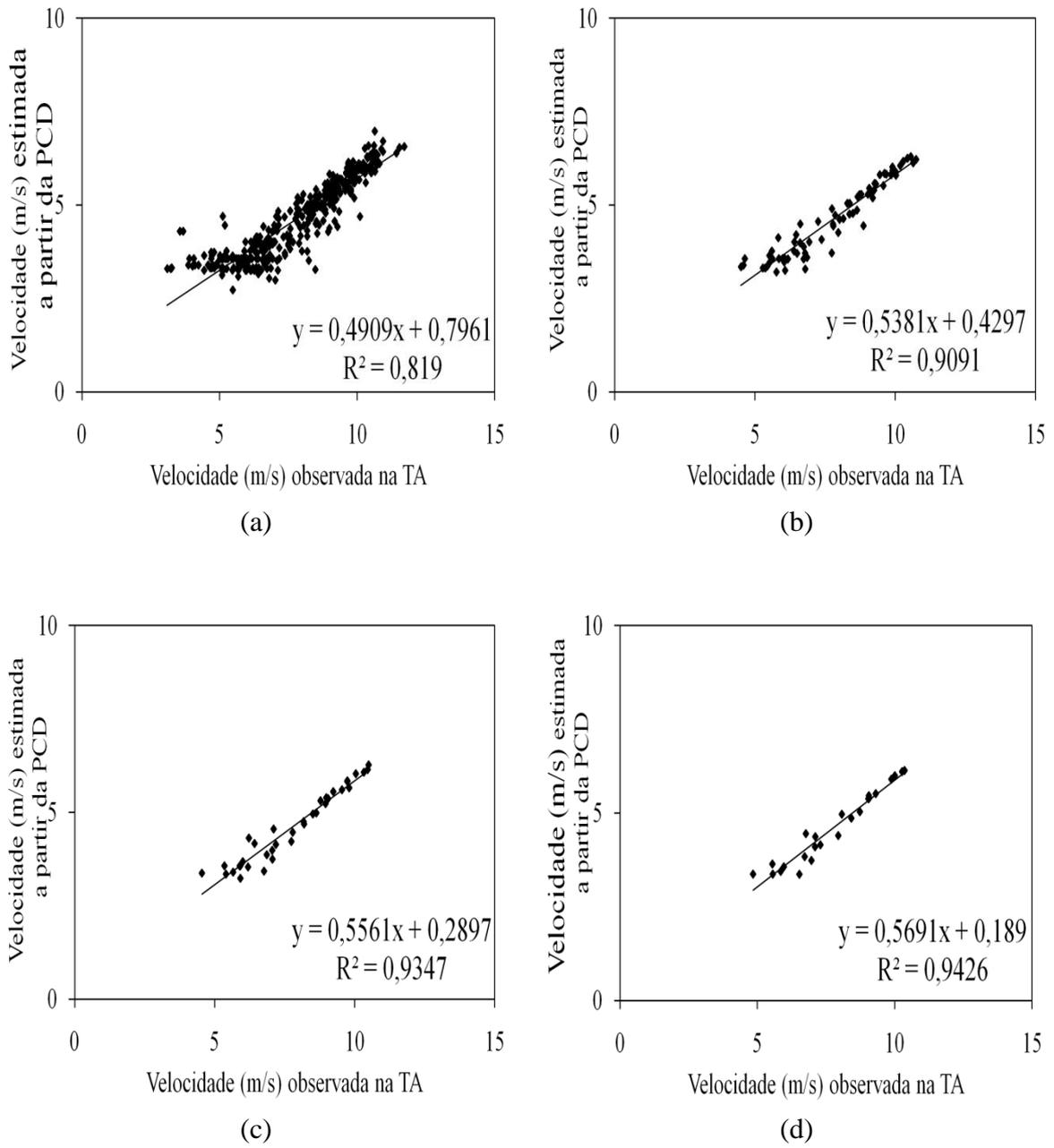


FIGURA 27 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de BAR para 40m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 40m na TA de Camocim (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

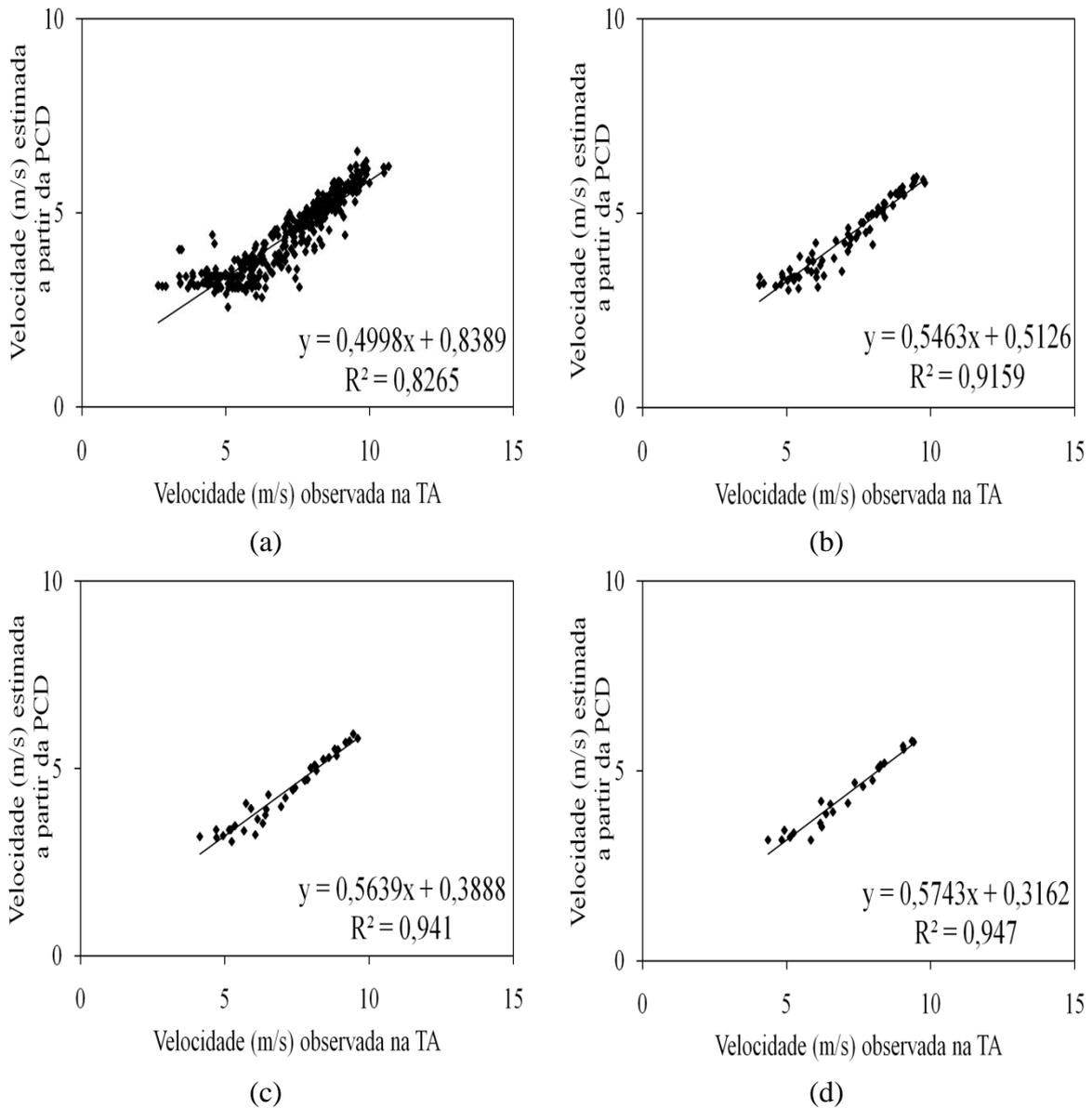


FIGURA 28 - Correlações entre os dados estimados pela PCD de BAR para 20m (eixo das ordenadas) e os dados observados à 20m na TA de Camocim (eixo das abscissas) obtidas para médias diárias (a), de 5 (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

Assim como se procedeu para a região de Paracuru, após a obtenção das equações das retas que representam o ajuste de regressão linear entre os conjuntos de dados de velocidade do vento, mostrados anteriormente, na calibração, foram obtidos valores estimados por essas retas para as três alturas de medição da TA de Camocim, e assim, foram comparados aos conjuntos de dados observados, visando investigar o desempenho do modelo de regressão linear em reproduzir a variabilidade da velocidade média do vento observada na região de Camocim a partir das médias

estimadas pelo perfil logarítmico do vento, obtido dos dados de velocidade do vento observados na PCD de BAR.

Na Figura 29 têm-se a comparação entre as séries de dados obtidos pelo método de regressão linear e os observados na TA de Camocim, para médias diárias, de 5 , de 10 e de 15 dias, na altura de 60 metros.

Nessa figura observa-se a existência de concordância entre os valores de velocidades médias estimadas pela regressão linear e observadas na TA de Camocim, para todos os períodos de cálculo das médias investigadas. A série de dados obtida pelo modelo de regressão linear, em geral, superestima a série dos dados observados, na estação seca da região e subestima a mesma na estação chuvosa. Essa observação torna-se mais evidente na medida em que se aumenta o período de cálculo das médias de velocidades do vento, característica também observada nas análises realizadas para a região de Paracuru.

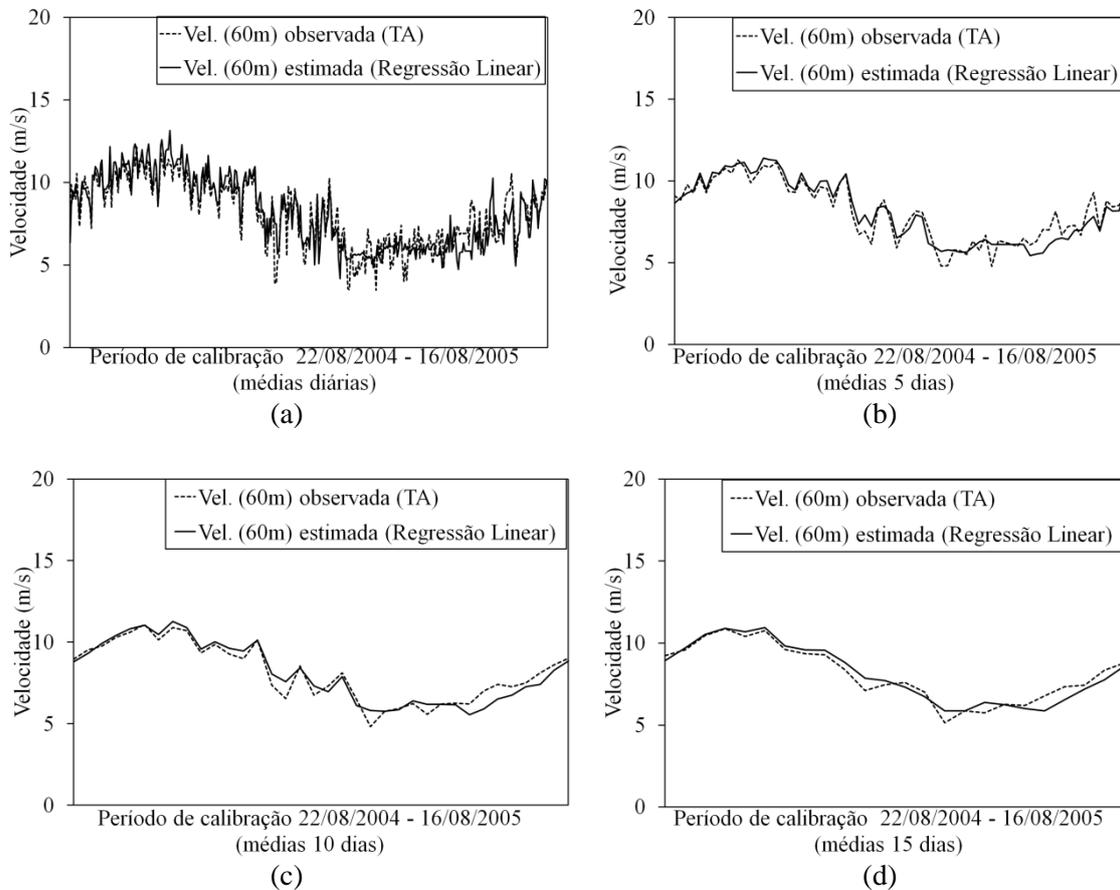


FIGURA 29 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 60 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

Na Figuras 30 tem-se a comparação entre as séries de dados obtidos pelo método de regressão linear e os observados na TA de Camocim, para médias diárias, de 5 , de 10 e de 15 dias, na altura de 40 metros. Os resultados indicam, novamente, períodos de subestimativa e superestimativa semelhantes aos citados na comparação anterior.

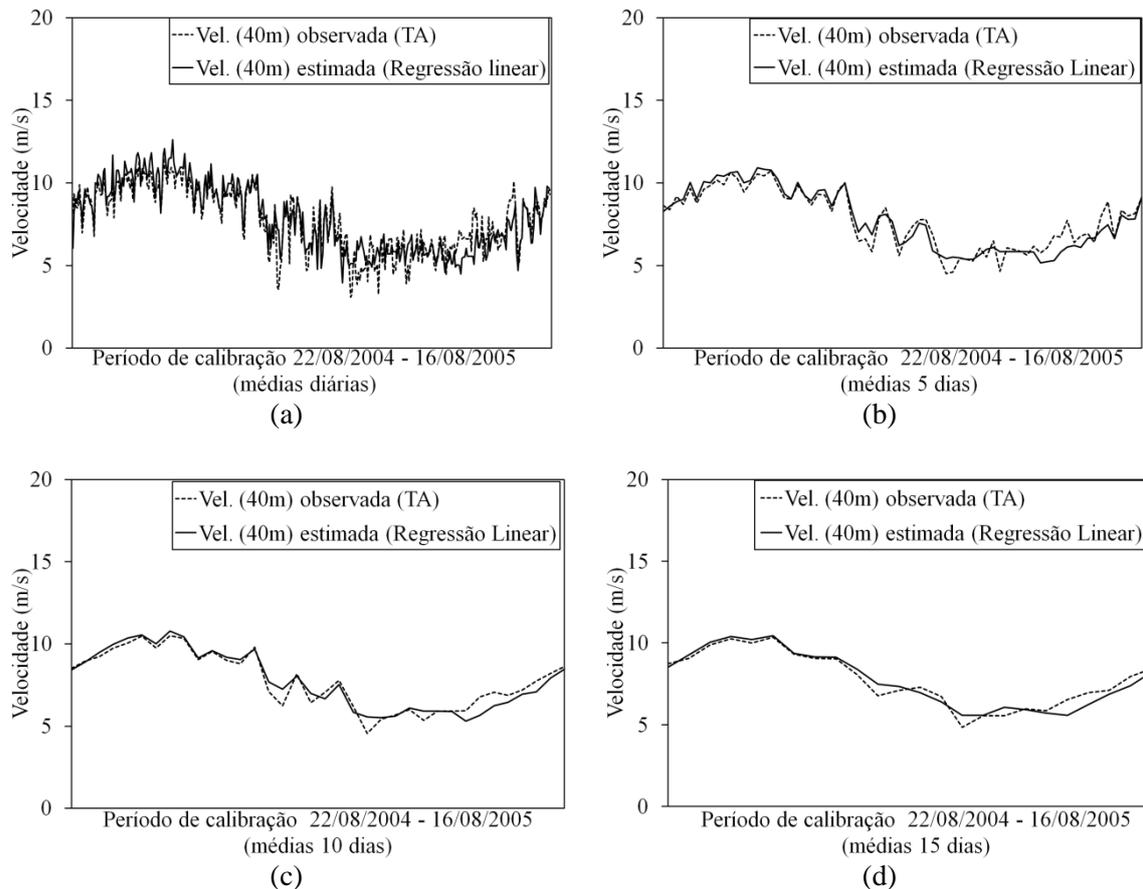


FIGURA 30 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 40 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

A Figura 31 mostra a comparação entre as séries de dados estimados pelo método de regressão linear e os observados na TA de Camocim, para médias diárias, de 5 , de 10 e de 15 dias, na altura de 20 metros.

Nessa comparação, também se têm superestimativas dos valores observados no período seco e subestimativas no período chuvoso, concordando, dessa forma, com o que fora mostrado nas comparações anteriores, para 60 e 40 metros. Essa

característica justifica-se pelo mesmo motivo já citado para a região de Paracuru, ou seja, pela semelhança das séries de dados de velocidade média do vento em altitude.

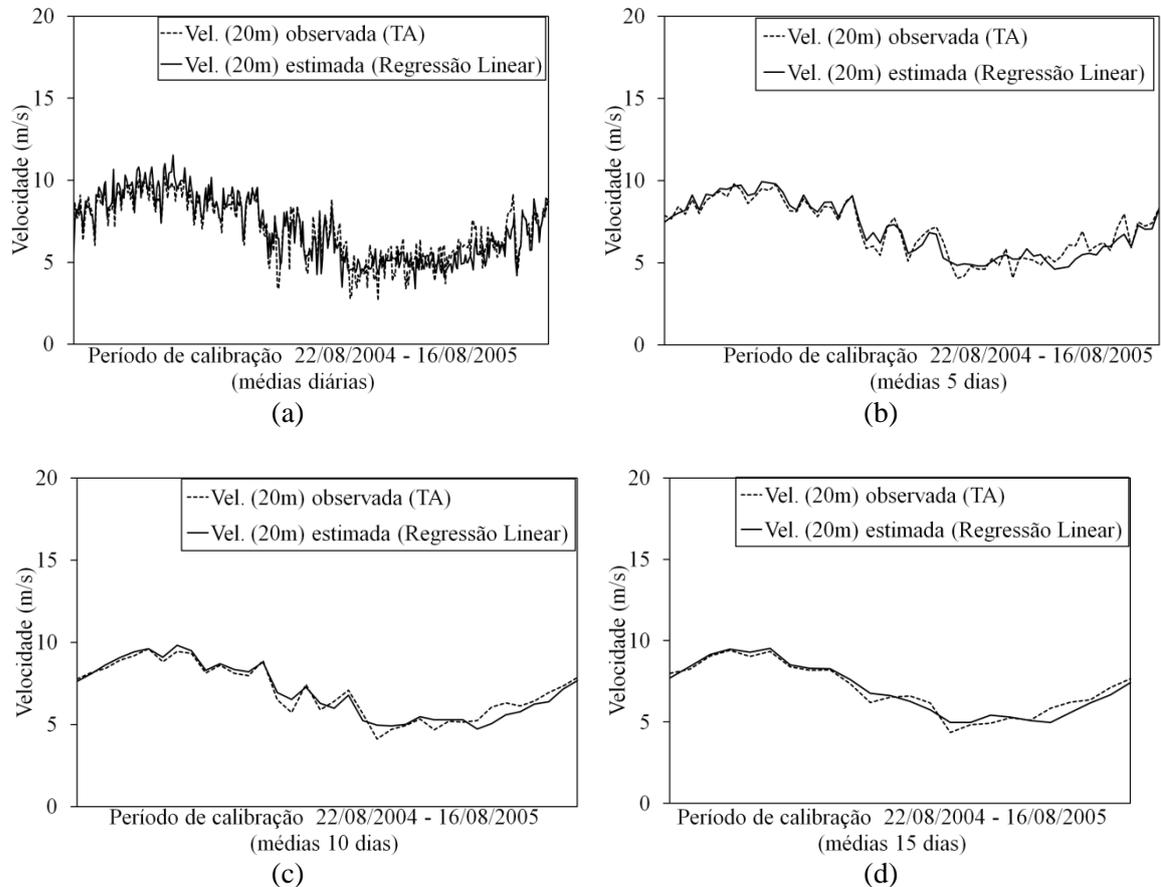


FIGURA 31 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 20 metros no período de calibração, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

A quantificação dos erros foi feita pelos mesmos métodos utilizados para a região de Paracuru. A Tabela 3 mostra para o período de calibração, os resultados dessa quantificação, bem como os valores dos coeficientes de correlação e determinação.

Na tabela observa-se, em geral, que quanto menores os erros, maiores são os coeficientes de correlação e, conseqüentemente, do coeficiente de determinação, confirmando-se assim o bom desempenho do modelo de regressão linear, já que segundo Devore (2006), tem-se uma correlação forte se  $0,8 \leq |r| \leq 1,0$ .

Os valores dos erros são ainda menores e os coeficientes de determinação maiores se comparados com os erros para o período de calibração da região de Paracuru, mostrados na Tabela 1.

Para as estimativas a 20 metros de altura os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,36 m/s, 0,28 m/s e 0,06%, todos registrados para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias.

Ainda nessa altitude, o coeficiente máximo de correlação foi de 0,97 para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 10 e de 15 dias e o coeficiente máximo de determinação explica 94% da variabilidade dados observados.

Nas estimativas a 40 metros, os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,40 m/s, 0,30 m/s e 0,02%, todos registrados para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias, em que se tem também coeficiente máximo de correlação (0,97) e o coeficiente máximo de determinação explicando 94% da variabilidade dos dados observados.

Em 60 metros, os menores valores dos erros acima citados foram respectivamente, 0,42 m/s, 0,33 m/s e 0,03%. Os dois primeiros registrados para o período de cálculo de 15 dias e o último para 10 dias. A 60 metros também ocorre o valor máximo do coeficiente de correlação (0,97) e o coeficiente máximo de determinação explica 94% da variabilidade dos dados observados.

TABELA 3 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados na TA pelas equações das retas de regressão e os dados observados na TA no período de calibração em Camocim.

<b>Altura (m)</b>	<b>Períodos nos quais se obteve as Médias das velocidades do vento</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>MAE (m/s)</b>	<b><math>\varepsilon</math> (%)</b>	<b>r</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>20 m</b>	Diárias	0,80	0,61	0,56	0,91	0,83
	5 dias	0,50	0,39	0,24	0,95	0,90
	10 dias	0,39	0,31	0,19	0,97	0,94
	15 dias	0,36	0,28	0,06	0,97	0,94
<b>40 m</b>	Diárias	0,92	0,69	1,16	0,89	0,79
	5 dias	0,55	0,41	0,04	0,95	0,90
	10 dias	0,44	0,33	0,04	0,97	0,94
	15 dias	0,40	0,30	0,02	0,97	0,94
<b>60 m</b>	Diárias	0,94	0,71	0,87	0,90	0,81
	5 dias	0,57	0,44	0,03	0,95	0,90
	10 dias	0,47	0,36	0,16	0,97	0,94
	15 dias	0,42	0,33	0,05	0,97	0,94

Como nas análises realizadas para a região de Paracuru, também foi realizado, um ajuste dos dados estimados aos observados, utilizando-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (2003), que mostrou significância de 95%.

#### 4.2.3 Período de validação – região de Camocim

Nesta seção, será investigado se o modelo de regressão linear tem, para o período de validação, desempenho satisfatório para previsão dos valores médios de velocidade do vento na região de Camocim.

Na Figura 32 têm-se a comparação, no período de validação entre as séries de dados obtidos pelo método de regressão linear e os observados na TA de Camocim, para médias diárias, de 5 , de 10 e de 15 dias, na altura de 60 metros.

Nessa figura observa-se que, em geral, a série de dados obtida pelo modelo de regressão linear, em geral, superestima a série dos dados observados na TA, tornando-se mais evidente na medida em que se aumenta o período das médias de velocidades do vento.

Esses resultados estão de acordo com os apresentados no período de calibração, quando também se tinha superestimativa nos mesmos intervalos de tempo, correspondente à estação seca da região.

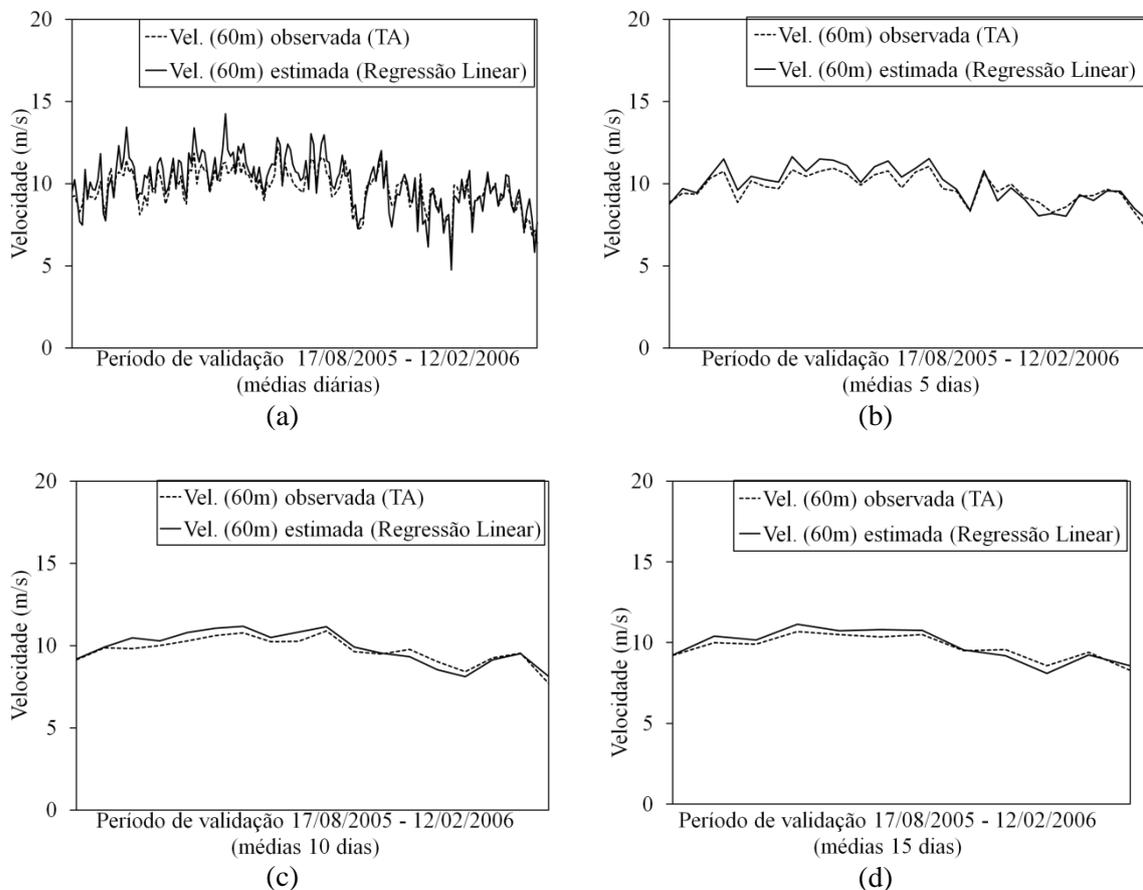


FIGURA 32 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 60 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

A Figura 33 mostra a comparação entre as séries de dados obtidos pelo método de regressão linear e os observados na TA de Camocim, para médias diárias, de 5 , de 10 e de 15 dias, na altura de 40 metros.

Analisando-se essa figura, verifica-se também a indicação de superestimativas e subestimativas das séries de dados observados, nos mesmos

intervalos de tempo verificados para o período de calibração (estação seca e estação chuvosa). Assim como na análise anterior, para altura de 60 metros, essa observação evidencia-se na medida em que se aumenta o período de cálculo das médias.

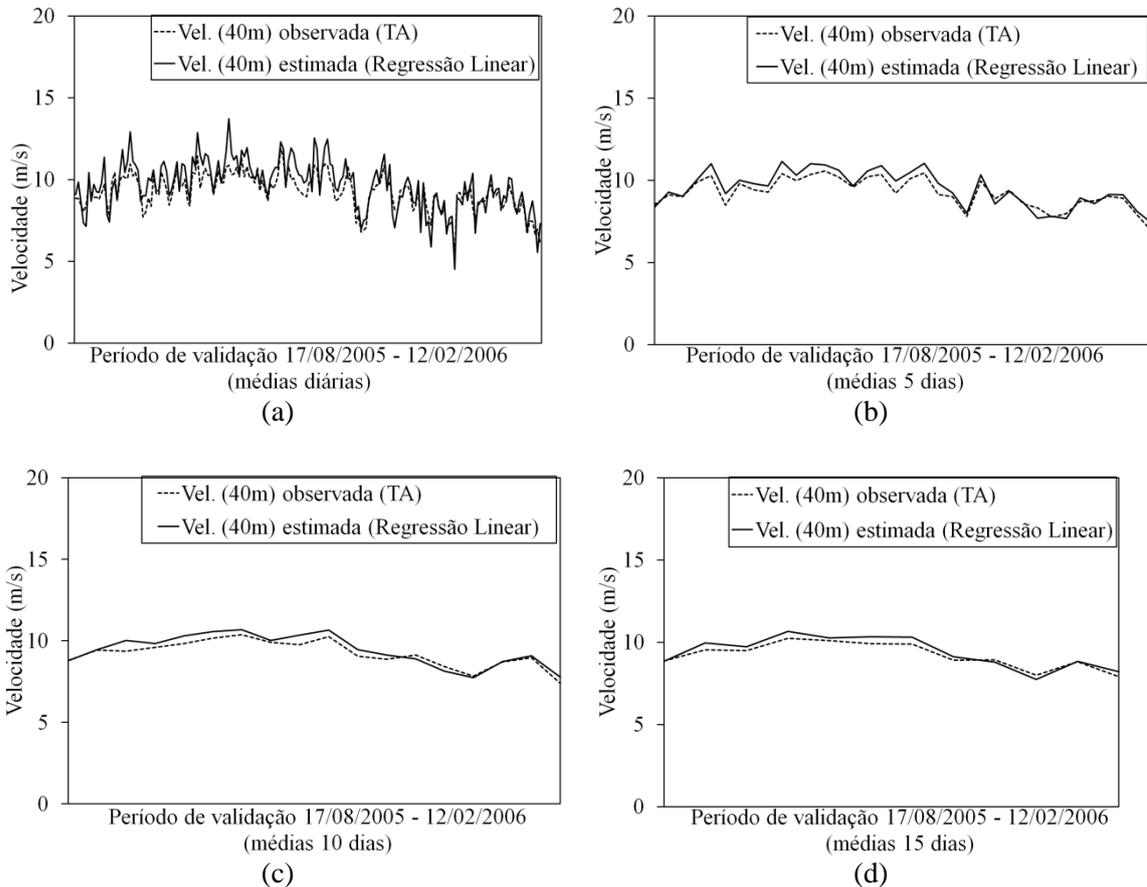


FIGURA 33 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 40 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

Na Figura 34 são mostradas as comparações entre as séries de dados obtidos pelo método de regressão linear e os observados na TA de Camocim, na altura de 20 metros.

Observa-se que, em geral, existe boa concordância entre as séries de dados calculados e observados, nos mesmos intervalos de tempo onde ocorrem superestimativa e subestimativa no período de calibração.

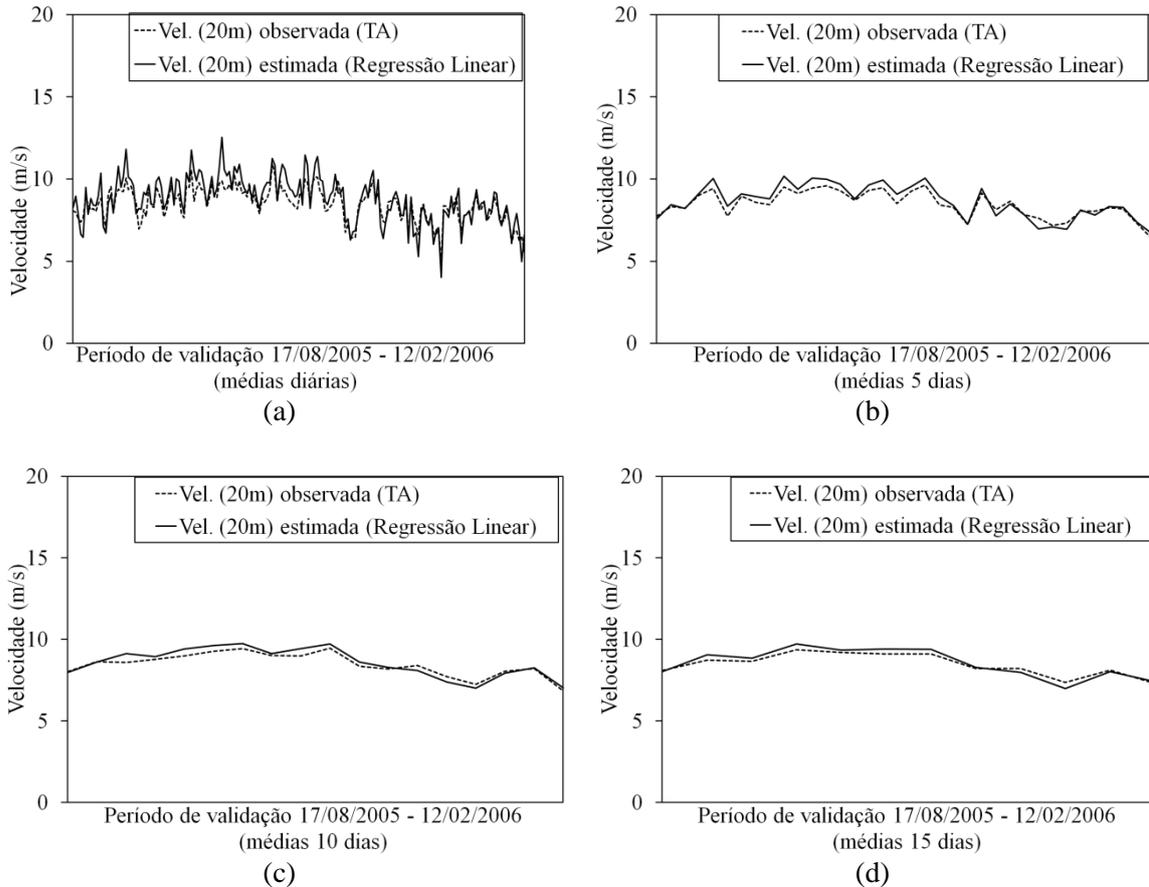


FIGURA 34 - Comparação entre as séries de dados estimados pela regressão linear e os dados observados na TA de Camocim para a altura de 20 metros no período de validação, para médias diárias (a), para médias de 5 dias (b), de 10 (c) e de 15 dias (d).

Adicionalmente para o período de validação, avaliou-se o grau de ajuste entre os dados observados e estimados, quantificando os mesmos erros que foram calculados para a região de Paracuru, bem como os coeficientes de correlação e determinação entre os dois conjuntos de dados. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Observa-se que a 20 metros de altura, ocorreram os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  que foram, respectivamente, 0,24 m/s, 0,21 m/s e 1,0%, todos encontrados para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias, em que também se verifica o coeficiente máximo de correlação (0,98) e o coeficiente máximo de determinação que explica 96% da variabilidade dos dados observados.

Em 40 metros, tem-se que os menores valores de RMSE, MAE e  $\varepsilon$  foram respectivamente, 0,28 m/s, 0,25 m/s e 1,8%, para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias, onde se tem o coeficiente máximo de correlação (0,98) e o coeficiente máximo de determinação explica (0,96), donde explicam-se 96% da variabilidade dos dados observados.

Para 60 metros, os menores valores dos erros foram encontrados respectivamente, 0,32 m/s, 0,29 m/s e 1,2%, para a comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias, em que se registra o coeficiente máximo de correlação (0,97) e o coeficiente máximo de determinação explica 94% da variabilidade dos dados observados.

TABELA 4 - Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados na TA pelas equações das retas de regressão e os dados observados na TA no período de validação para a região de Camocim.

<b>Altura (m)</b>	<b>Períodos nos quais se obteve as médias das velocidades do vento</b>	<b>RMSE (m/s)</b>	<b>MAE (m/s)</b>	<b><math>\varepsilon</math> (%)</b>	<b>r</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>20 m</b>	Diárias	0,72	0,58	3,7	0,90	0,81
	5 dias	0,34	0,28	1,9	0,97	0,94
	10 dias	0,28	0,24	1,5	0,97	0,94
	15 dias	0,24	0,21	1,0	0,98	0,96
<b>40 m</b>	Diárias	0,82	0,66	4,6	0,90	0,81
	5 dias	0,41	0,35	2,7	0,96	0,92
	10 dias	0,33	0,28	2,2	0,97	0,94
	15 dias	0,28	0,25	1,8	0,98	0,96
<b>60 m</b>	Diárias	0,84	0,68	3,7	0,89	0,79
	5 dias	0,44	0,37	2,1	0,95	0,90
	10 dias	0,37	0,32	1,7	0,95	0,90
	15 dias	0,32	0,29	1,2	0,97	0,94

Novamente, tanto para o período de calibração quanto para o de validação os valores de RMSE e MAE são inferiores aos erros encontrados por Santiago de

Maria (2006), quando o mesmo comparou os valores de velocidade média do vento observados na TA de Camocim com os valores simulados com o RAMS a 20, 40 e 60 metros. Entretanto, os valores dos coeficientes de correlação aqui apresentados, em geral, coincidem com os valores encontrados pelo autor acima citado.

Em adição, ressalta-se que, o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (2003) mostra que os resultados obtidos apontam um nível de significância de 95%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de regressão linear no qual esse estudo se baseou, para estimar valores de velocidades médias do vento em altitude, em regiões litorâneas do Ceará, mostrou satisfatório desempenho tanto no período de calibração quanto no período de validação do modelo, seja pelo alto índice de concordância entre as séries de dados estimados e a série de dados observados e seus respectivos coeficientes de correlação, seja pelos baixos valores dos erros quantificados.

Embora o modelo tenha sido utilizado para regiões litorâneas do Estado do Ceará, existe a possibilidade do mesmo ser utilizando-se dados das PCDs localizadas em regiões do interior do Estado.

Particularmente, para a região de Paracuru, identificou-se tanto na PCD de SGA quanto na TA de Paracuru, a predominância de ventos de leste, com variações entre direções de Nordeste a Sudoeste. Os perfis diários e mensais também apresentam características semelhantes em relação à variabilidade temporal da velocidade do vento, respeitando-se, evidentemente, as diferentes alturas nas quais as velocidades médias do vento foram medidas. Em relação ao perfil diário médio, tanto na PCD quanto na TA, os valores máximos de velocidade média do vento ocorreram por volta das 15:00h horário local, enquanto que em relação ao perfil mensal, os maiores valores de velocidade média do vento foram registrados na estação seca da região.

Nessa região, em geral, os erros RMSE e MAE foram ligeiramente maiores para o período de calibração, comparando-se com àqueles quantificados no período de validação. Os menores erros RMSE, MAE e  $\epsilon$ , no período de calibração, foram respectivamente, 0,70 m/s, 0,58 m/s e 0,01%. Os dois primeiros registrados para comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias à altura 20 e à 40 metros, respectivamente. Já o maior valor do coeficiente de correlação foi de 0,91 registrado para médias de 10 e de 15 dias à 20 metros e o maior valor do coeficiente de determinação explica 83% da variabilidade dos dados observados.

Adicionalmente, no período de validação, esses mesmos erros foram de 0,66 m/s, 0,56 m/s e 5,3%, todos registrados para comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias à 40 metros. O maior valor do coeficiente de correlação foi 0,99 registrados para médias de 15 dias à 20 metros, e maior valor do coeficiente de determinação explica 98% da variabilidade dos dados observados.

Para a região de Camocim, tanto na PCD de BAR quanto na TA de Camocim, predominam também os ventos de leste, com variações entre direções de Nordeste a Sudeste, como observado na região de Paracuru. Identificaram-se também semelhanças entre os perfis de velocidade média diária e mensal. Em relação ao perfil diário de velocidade média do vento observado na região, cita-se que o valor máximo de velocidade média, na PCD de BAR ocorreu às 14:00h horário local e na TA de Camocim ocorreu às 17:00h horário local. Já em relação ao perfil mensal, os maiores valores de velocidade média do vento foram registrados na estação seca da região, tanto na PCD de BAR como na TA

Na região de Camocim, em geral, os erros RMSE e MAE também foram um pouco maiores no período de calibração, quando comparados com àqueles quantificados no período de validação. Os menores erros RMSE, MAE e  $\epsilon$ , no período de calibração, foram respectivamente, 0,36 m/s, 0,28 m/s e 0,02%. Os dois primeiros registrados para comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias à altura de 20 e 40 metros, respectivamente. Já o maior valor do coeficiente de correlação foi de 0,97, encontrado para a comparação das médias de 10 e de 15 dias nas três altitudes, sendo que o maior valor do coeficiente de determinação encontrado explica 94% da variabilidade dos dados observados.

Adicionalmente, no período de validação, em Camocim, esses mesmos erros foram de 0,24 m/s, 0,21m/s e 1,0%, todos obtidos para comparação entre as séries de valores médios estimados e observados de 15 dias à 20 metros. O maior valor do coeficiente de correlação foi 0,98 obtidos para a comparação entre as médias de 15

dias à 20 e 40 metros, sendo que o maior valor do coeficiente de determinação explica 96% da variabilidade dos dados observados.

Diante dos resultados obtidos, confirma-se que as regiões de Paracuru e Camocim caracterizam-se como potenciais sítios, favoráveis para o aproveitamento da energia eólica. Conclui-se ainda que a estimativa de recursos eólicos em altitude a partir de dados observados em superfície, usando-se a metodologia proposta nesse trabalho, é um processo viável tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro.

Para trabalhos futuros nessa linha de investigação, previsão de recursos eólicos, propõe-se o uso de regressão linear múltipla, ou seja, a utilização de uma única variável dependente, porém com duas ou mais variáveis independentes, com a finalidade de se melhorar a capacidade de estimativa na região.

Outra possibilidade é a quantificação do potencial energético a partir dos valores de velocidade média do vento observados nas TAs e os valores estimados pelo modelo de regressão linear a partir dos dados de superfície.

## 6 BIBLIOGRAFIA

BARRETO, Aldinete B., ARAGÃO, Maria R. S. e BRAGA, Célia C. **Estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz de Iguaçu. Anais XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia - 2030.** Disponível em <[www.epe.gov.br/PNE](http://www.epe.gov.br/PNE)>. Acesso em: 18 agosto 2009.

CAMELO, Henrique do N. et al. **Estudo da circulação local na região do vale do rio Jaguaribe no estado do Ceará.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

CARVALHEIRO, Luis C. O. et al. **Validação da Temperatura da Superfície do Mar a partir de medições de satélite.** Disponível em <[www.ame-web.org/jornadas/6b\\_carvalho.pdf](http://www.ame-web.org/jornadas/6b_carvalho.pdf)>. Acesso em: 15 setembro 2009.

CARVALHO, Paulo. **Geração eólica.** Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003. 146 p.

CASTRO, Rui M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: introdução à energia eólica.** 3 ed. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

CHOU, Sin C. et al. **Mapeamento eólico para o Nordeste.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

DEVORE, Day L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DOBRIANSKY, Paula. **Energia limpa para o futuro.** Revista eJournal USA: Perspectivas Econômicas, Washington, D.C, v 11, n. 2, 4-6, 2006.

FISCH, Gilberto et al. **Uso do sistema GPS para a determinação do vento em altitude.** Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, v.13, n.1, 65-70, junho, 1998.

KOLMOGOROV-SMIRNOV. Disponível em <[www.physics.csbsju.edu/stats/KS-test.html](http://www.physics.csbsju.edu/stats/KS-test.html)>. Acesso em: 15 outubro 2009.

LEAL JUNIOR, João B. V. et al. **Estudo da variabilidade temporal do vento no estado do Ceará para identificação de padrões de circulação local.** In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

LEMES, Marco A. M. e MOURA, Antonio D. **Fundamentos de dinâmica aplicados à meteorologia e oceanografia**. Ribeirão Preto: Holos, 2002. 296p.

LOPES, Gláucia M. et al. **Caracterização da velocidade e direção do vento em Mossoró-RN, para as quatro estações do ano**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz de Iguaçu. Florianópolis. Anais XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002.

LYRA, Gustavo B. e PEREIRA, Antonio Roberto. Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre vegetação esparsa em região semi-árida. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.22, n.2, 262-272, agosto, 2007.

MARQUES, Haroldo A. et al. **Modelagem do atraso zenital troposférico a partir de regressão linear múltipla**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2, 2007, Presidente Prudente. Anais Simpósio Brasileiro de Geomática, 2007.

MARTINS, Fernando R.; GUARNIERI, Ricardo A. e PEREIRA, Enio B. **O aproveitamento da energia eólica**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 30, n. 1, março, 2008.

MOLION, Luiz C. B. e BERNARDO, Sergio de O. **Variabilidade do vento para cidade de Maceió-AL**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.

MURTA, Rogério Mendes et al. **Precipitação pluvial mensal em níveis de probabilidade pela distribuição gama para duas localidades do Sudoeste da Bahia**. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 9, n. 2, 2005.

OLIVEIRA, Juliana Lima. **Influência da circulação geral e da variabilidade interanual sobre o potencial eólico do Nordeste brasileiro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, 2007.

OMETTO, José Carlos. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo, SP. Agronômica “Ceres”. 1981.

ROBALLO, Suelen T. e FISCH, Gilberto. **Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): parte 1 – aspectos observacionais**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.23, n.4, 509-510, dezembro, 2008.

SACRAMENTO, Elissandro M. et al. **Estudo preliminar sobre o potencial eólico das regiões serranas do Ceará**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

Santiago de Maria, Paulo H. S., COSTA, Alexandre A. e SOMBRA, Sérgio S. **Simulação de ventos em alta resolução no litoral do Ceará.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Florianópolis. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

SEINFRA. Mapa do Potencial Eólico do Estado do Ceará. 2001. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/downloads/Atlas.zip>>. Acesso em: 25 maio 2009.

SILVA, Bernardo B.; ALVES, Jackson J. A. e CAVALCANTI, Enilson P. **Caracterização do potencial eólico da direção predominante do vento no estado da Bahia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz de Iguaçu. Florianópolis. Anais XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002.

SILVA, Gustavo Rodrigues. **Características de vento da região Nordeste:** análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SILVA, Maria Gertrudes Alvarez Justi da. **Umidade, condensação e nuvens.** Rio de Janeiro, RJ. 1998. Traduzido de AHRENS, A. D. *Essentials of Meteorology: an invitation to the atmosphere.* West Publishing Company, New York, 1998.

STULL, R.B. **An introduction to Boundary Layer Meteorology.** (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988).

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia. Versão Digital 2.** Recife, PE. 2006. Disponível em <<http://www.agritempo.gov.br>>. Acesso em 13 março 2009

VELHOTE, Denise e GHISOLF, Renato D. **Análise das intensidades de vento estimadas pelo altímetro TOPEX/Poseidon e dados medidos *in situ* à bordo de navios para o Atlântico Sul Ocidental.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996.

VIANELLO, Rubens L. e ALVES, Rainier A. **Meteorologia Básica e Aplicações.** Viçosa, UFV. Impr. Univ. 1991.

VIEIRA, Antonio Carlos. **Atlas eólico vai medir potencial do Ceará.** Disponível em <[www.seinfra.ce.gov.br](http://www.seinfra.ce.gov.br)>. Acesso em: 20 agosto 2009.

## ANEXO A - O modelo de regressão linear

Segundo Devore (2006), a relação matemática determinística mais simples entre duas variáveis  $x$  e  $y$  é uma relação linear  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ . O conjunto de pares  $(x, y)$  para o qual  $y = \beta_0 + \beta_1 x$  determina uma reta com coeficiente angular  $\beta_1$  e termo constante  $\beta_0$ . Se as duas variáveis não estiverem relacionadas deterministicamente, então, para um valor fixo de  $x$ , o valor da segunda variável será aleatório. Na maioria das vezes, a variável cujo valor é fixado pelo pesquisador será representada por  $x$  e será chamada de variável independente, previsão ou explicativa. Para um  $x$  fixo, a segunda variável será aleatória; representamos essa variável aleatória e seu valor observado por  $Y$  e  $y$ , respectivamente, e as chamamos de variáveis dependentes ou resposta.

Adicionalmente, em geral, as observações serão feitas para inúmeros conjuntos da variável independente. Assim, sejam  $x_1, x_2, \dots, x_n$  os valores da variável independente para as quais são feitas as observações e sejam  $Y$  e  $y$ , respectivamente, a variável aleatória e o valor observado associados a  $x_i$ . Portanto, os dados bivariados fornecidos consistem nos  $n$  pares  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ . O primeiro passo na análise de regressão com duas variáveis é elaborar um gráfico de dispersão dos dados observados. Em um gráfico desse tipo, cada  $(x_i, y_i)$  é representado como um ponto representado graficamente em um sistema de coordenadas bidimensional.

Para o modelo determinístico  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ , o valor de  $y$  é uma função linear de  $x$ . Ao se fazer uma generalização apropriada dessa característica para um modelo probabilístico pressupõe-se que o valor esperado de  $Y$  é uma função linear de  $x$ , mas que, para um  $x$  fixo, a variável  $Y$  difere de seu valor esperado de uma quantidade aleatória.

Existem parâmetros  $\beta_0, \beta_1$  e  $\sigma^2$  tais que, para qualquer valor fixo da variável independente  $x$ , a variável dependente está relacionada a  $x$  por meio da equação do modelo expressa pela forma geral  $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$ . Onde  $\epsilon$  é a quantidade que representa uma variável aleatória, considerada normalmente distribuída com  $E(\epsilon) = 0$  e

$V(\epsilon) = \sigma^2$ , onde  $E(\epsilon)$  representa o valor esperado ou valor médio de  $\epsilon$  e  $V(\epsilon)$  representa a variância de  $\epsilon$ .

A variável  $\epsilon$  normalmente é chamada de desvio aleatório ou erro aleatório do modelo. Sem o erro ou desvio aleatório, qualquer par observado  $(x, y)$  corresponderia a um ponto disposto exatamente sobre a reta  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ , denominada reta de regressão real (ou da população). A inclusão do termo “erro aleatório” permite que  $(x, y)$  fique acima da reta de regressão real (quando  $\epsilon > 0$ ) ou abaixo da reta de regressão (quando  $\epsilon < 0$ ). Os pontos  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  resultantes de  $n$  observações independentes serão então dispersos próximos da reta de regressão.

#### I. Coeficiente de Determinação e coeficiente de correlação amostral

O coeficiente de determinação, representado por  $R^2$ , é dado por:

$$R^2 = 1 - (\text{SQE}/\text{SQT}) \quad (1)$$

Onde SQE é a soma dos quadrados dos erros e SQT representa a soma dos desvios quadrados ao redor da média amostral dos valores observados de  $y$ . Esse coeficiente pode ser interpretado como a proporção da variação de  $y$  observada que pode ser explicada pelo modelo de regressão linear simples. Quanto mais alto o valor de  $R^2$ , mais o modelo de regressão consegue explicar a variação de  $y$ .

Em algumas situações o estudo do comportamento conjunto de duas variáveis objetiva verificar se elas estão relacionadas, e não usar uma para prever a outra. Dados  $n$  pares de observações  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , é natural que se considere a hipótese de  $x$  e  $y$  como tendo uma relação positiva, se os maiores valores de  $x$  estiverem pareados com os maiores valores de  $y$  e os menores valores de  $x$  com os menores valores de  $y$ . De modo semelhante, se os maiores valores de  $x$  estiverem pareados com os menores valores de  $y$  e os menores valores de  $x$  com os maiores valores de  $y$ , então está implícita uma relação negativa entre as variáveis (Devore, 2006).

O coeficiente de correlação amostral ( $r$ ) de  $n$  pares  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  é dado por:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

Onde:

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \quad (3)$$

Em que,  $S_{xy}$  **representa o numerador do coeficiente angular da reta de regressão linear**;  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias amostrais dos conjuntos dos  $x$  e  $y$ , respectivamente.

O coeficiente de correlação amostral indica o quão forte  $x$  e  $y$  estão relacionados, independentemente das unidades particulares usadas para medi-los.

As propriedades de  $r$  que merecem destaque são as seguintes:

- I. O valor de  $r$  não depende de qual das duas variáveis em estudo é chamada de  $x$  e qual é chamada de  $y$ ;
- II. O valor de  $r$  independe de unidades com as  $x$  e  $y$  são medidos;
- III.  $-1 \leq r \leq 1$ ;
- IV.  $r = 1$  se, e somente se, todos os pares  $(x_i, y_i)$  estiverem alinhados em linha reta com um coeficiente angular positivo, ao passo que  $r = -1$  se, e somente se, todos os pares  $(x_i, y_i)$  estiverem alinhados com um coeficiente angular negativo;
- V. O quadrado do coeficiente de correlação amostral fornece o valor do coeficiente de determinação que resultaria de um ajuste do modelo de regressão linear simples.

A propriedade II equivale a dizer que  $r$  não muda se cada  $x_i$  for substituído por  $cx_i$  e cada  $y_i$  for substituído por  $dy_i$  (uma mudança na escala de medida), tanto

como se cada  $x_i$  for substituído por  $x_i - \mathbf{a}$  e  $y_i$  por  $y_i - \mathbf{b}$  (o que muda o lugar de zero no eixo da medida).

A propriedade III expressa que o valor máximo de  $r$ , corresponde ao maior grau possível de relação positiva, é  $r = 1$ , ao passo que a relação mais negativa é identificada com  $r = -1$ . De acordo com a propriedade IV, as maiores correlações positivas e negativas são alcançadas somente quando todos os pontos se estendem sobre uma linha reta. Qualquer outra configuração de pontos, mesmo se a configuração sugerir uma relação determinística entre as variáveis, produzirá um valor  $r$  menor que 1 em magnitude absoluta. Portanto,  $r$  mede o grau de relação linear entre variáveis. Um valor de  $r$  próximo de 0 não é uma evidência de que não existe uma relação forte, mas apenas de que falta uma relação linear, de modo que esse valor de  $r$  deve ser interpretado com cuidado.

Ainda segundo Devore (2006), a correlação é fraca se  $0 \leq |r| \leq 0,5$ ; forte se  $0,8 \leq |r| \leq 1$  e moderada caso contrário.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)