



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

FLAVIO JOSE ALEXANDRE LINARD

**ESTIMATIVAS DA VELOCIDADE DO VENTO EM ALTITUDE USANDO O
SOFTWARE WINDOGRAPHER®**

FORTALEZA – CEARÁ

2010

FLAVIO JOSE ALEXANDRE LINARD

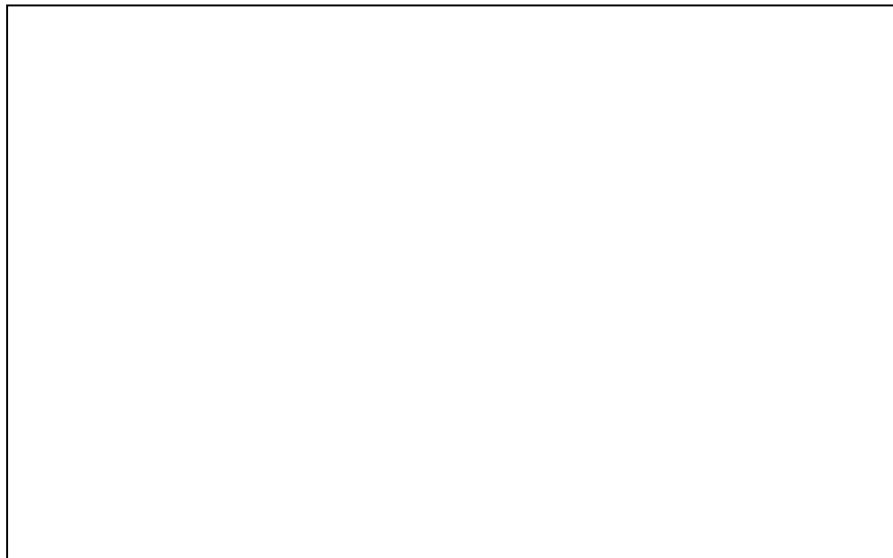
**ESTIMATIVAS DA VELOCIDADE DO VENTO EM ALTITUDE USANDO O
SOFTWARE WINDOGRAPHER®**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Bacharelado em Física do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva.

FORTALEZA – CEARÁ

2010



FLÁVIO JOSÉ ALEXANDRE LINARD
ESTIMATIVAS DA VELOCIDADE DO VENTO EM ALTITUDE USANDO O
SOFTWARE WINDOGRAPHER®

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Bacharelado em Física do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Física.

Aprovada em: 12 / 03 / 2010.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará - UECE
(Orientador)

Prof. Dr. Francisco Sales Ávila Cavalcante
Universidade Estadual do Ceará - UECE

Prof. Msc. Marcos Antônio Tavares Lira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

A meus pais, Filomeno e Rita,
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para nunca ter desistido dessa árdua caminhada;

Aos meus irmãos, Francisco Alberto e Fabíola e em especial meus pais, Filomeno e Rita;

À Universidade Estadual do Ceará, por intermédio do Departamento de Física, pela oportunidade de realizar este curso;

Ao Professor Dr. Emerson Mariano da Silva pela amizade, orientação, confiança e paciência demonstradas durante a realização deste trabalho;

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), pelos dados usados nesse estudo;

Aos meus grandes amigos do Centro Acadêmico de Física (C.A.F.), pelos grandes momentos que jamais serão esquecidos, em especial Rafael Aragão Magalhães;

A Marcos Antônio Tavares Lira, por sua inestimável contribuição para a realização deste trabalho.

"O *presente* é a única coisa que não tem fim."

Erwin Schrödinger

RESUMO

Apresenta-se nesse estudo, a estimativa das velocidades média do vento em altitude utilizando-se o software gráfico Windographer[®], que usa a formulação do perfil logarítmico do vento para estimar as velocidades em altitude. Para tal estimativa foram usados dados de velocidade do vento, em superfície (10 metros) coletados pela Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), no município de Barroquinha, região litoral oeste do Estado do Ceará, no período de setembro de 2004 a agosto de 2005. Os dados observados foram usados como condição inicial para as estimativas em altitude, assim, foram estimados valores de velocidades do vento para as altitudes de 20, 40 e 60 metros, variando-se os valores do parâmetro de rugosidade (z_0) entre 0,01 e 1,90 metros. Em seguida as séries de dados estimados foram comparadas com as de dados observados, obtidas na Torre Anemométrica (TA) da Secretaria de Infra-Estrutura do Ceará (SEINFRA/CE), instalada no município de Camocim, região litoral oeste do Estado. Os resultados mostraram que as séries de valores estimados com o software concordam com as observadas, apresentando coeficiente de correlação estatística variando entre 0,97 e 0,98 e coeficiente de determinação entre 0,94 e 0,96 para as alturas investigadas. Adicionalmente, encontrou-se que o valor do parâmetro de rugosidade que minimizou os erros entre as séries de dados foi de 1,90 metros.

Palavras - chave: velocidade do vento, perfil logarítmico, parâmetro de rugosidade.

ABSTRACT

It is presented in this study, the estimated average wind speeds at high altitude using the graph software Windographer[®], which uses the formulation of the logarithmic profile to estimate wind speeds at altitude. For this estimate we used data from wind speed, in surface (10 meters) collected by the Platform for Data Collection (PDC) of the Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) in the municipality of Barroquinha, coastal region west of the State of Ceará in the period September 2004 to August 2005. The observed data were used as initial condition for the estimates in altitude, so wind speeds values were estimated for the altitudes of 20, 40 and 60 meters, ranging the values of the roughness parameter (z_0) between 0.01 and 1.90 meters. Then the data series estimated were compared with observed data obtained in the tower anemometer (TA) of the Secretaria de Infra-Estrutura do Ceará (SEINFRA/CE), located in the municipality of Camocim, coastal region west of the state. The results showed that the series values estimated with the software agree with those observed, showing a statistical correlation coefficient ranging between 0.97 and 0.98 and determination coefficient between 0.94 and 0.96 to the heights investigated. Additionally, it was found that the value of the roughness parameter which minimized the errors between the data sets was 1.90 meters.

Keywords: wind speed, logarithmic profile, roughness parameter.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CLA - Centro de Lançamento de Alcântara.

CQ - Canoa Quebrada

IPE - Experimento Integrado do Pantanal.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.

MAE - Erro Absoluto Médio.

LBA/TRMM - *Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia / Tropical Rain Measurement Mission.*

PCD - Plataforma de Coleta de Dados.

PDFs - Funções Densidade de Probabilidade.

RMSE - Erro Médio Quadrático.

RBLE - *Rondonia Boundary Layer Experiment*

SCR - São João do Cariri

SEINFRA - Secretaria da Infra-Estrutura do Ceará.

TA - Torre Anemométrica.

WAsP - *Wind Atlas Analysis and Application Program.*

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 et al. (2008).....	15
FIGURA 2 – Mapa do Estado do Ceará com destaque para as áreas de estudo os municípios de Barroquinha e Camocim.....	21
FIGURA 3 – Interface gráfica do software Windographer [®] , mostrando a direção do vento, dados mensais e diários da velocidade do vento e informações como o parâmetro de rugosidade.....	25
FIGURA 4 – Médias mensais da velocidade do vento na PCD de Barroquinha.....	26
FIGURA 5 – Médias mensais da velocidade do vento na TA de Camocim nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005.....	27
FIGURA 6 – Velocidades médias do vento na altura de 20 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro.....	28
FIGURA 7 – Velocidades médias do vento na altura de 40 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro.....	28
FIGURA 8 – Velocidades médias do vento na altura de 60 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro.....	29
FIGURA 9 – Velocidades médias do vento na altura de 20 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetro de rugosidade 1,90 metros.....	31
FIGURA 10 – Velocidades médias do vento na altura de 40 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros.....	32

FIGURA 11 – Velocidades médias do vento na altura de 60 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros.....33

TABELA 1 – Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados, a partir dos dados da PCD e os dados observados na TA de Camocim.....30

TABELA 2 – Estimativa de erros entre as velocidades médias na TA de Camocim e as velocidades médias estimadas a 20, 40 e 60 metros utilizando rugosidade 1,9 metros.....33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Camada Limite Superficial.....	15
2.2 Estudos relacionados ao tema.....	17
3 METODOLOGIA E DADOS.....	23
3.1 Localização geográfica.....	23
3.2 Base de dados e correção de falhas.....	24
3.3 Parâmetro de rugosidade.....	24
3.4 Erro absoluto, erro relativo e erro quadrático médio.....	25
3.5 Coeficiente de correlação e coeficiente de determinação.....	26
3.6 O software Windographer®.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Velocidade do vento observado e estimativas em altitude.....	29
4.2 Estimativa da velocidade média do vento em altitude com z_0 igual a 1,90m.....	34
5 CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica além de ser uma energia considerada limpa, por trazer menos poluição ao meio ambiente em comparação com outras formas de geração de energia, é de suma importância nos períodos onde se tem escassez de recursos hídricos, pois aparece como fonte complementar na matriz energética regional, o que pouparia os estoques de água da região.

Embora os investimentos para a geração dessa forma de energia ainda sejam altos é de consenso da sociedade em geral que o uso da energia eólica trará no futuro uma recompensa tanto financeira quanto ambiental, pois o Brasil apresenta regiões com um grande potencial eólico.

Nesse contexto, concordante com a importância do tema, encontram-se na literatura diversos estudos que usam métodos estatísticos com o objetivo de se estimar os recursos eólicos observados em diversas regiões no país. Dentre eles podemos citar Lima (2008) e Magalhães (2009) que realizaram estudos com esse propósito, fazendo uso de distribuições de probabilidade de Weibull, Rayleigh e Log-Normal para estimar o potencial eólico em regiões do Estado do Ceará.

Outro estudo que merece destaque é o realizado por Lira (2009), que utilizou o método de regressão linear, juntamente com a teoria da camada limite atmosférica onde se tem a formulação matemática do perfil logarítmico do vento, para estimar a velocidade do vento em altitude em duas regiões litorâneas do Estado do Ceará.

Dessa forma, o objetivo desse estudo é estimar velocidade do vento em altitude usando a formulação matemática do perfil logarítmico do vento que encontra-se implementada no software gráfico Windographer[®], para avaliar se o uso

do mesmo é satisfatório para estimar os recursos eólicos numa região litorânea do Estado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Camada Limite Superficial

Segundo Martins *et al.* (2008), define-se Camada Limite Atmosférica (CLA) como a região compreendida entre a superfície e uma altura variável entre 100 e 3000 m de altura e que apresenta um comportamento diferente do restante da atmosfera devido às interações superfície-atmosfera.

A Camada Limite Superficial (CLS), contida na CLA, estende-se desde o solo até aproximadamente 100 a 120 metros. Nesta camada ocorrem grandes variações da temperatura, umidade e do vento com a altura, fazendo com que trocas turbulentas mais intensas de momentum, calor e umidade ocorram na mesma.

Uma compreensão do regime de ventos e da turbulência atmosférica na CLS é de grande importância nos estudos da Meteorologia Aeroespacial, pois de suas características são extraídas informações básicas para o projeto e desenvolvimento de foguetes e veículos espaciais (ROBALLO e FISCH, 2008). A Camada Limite Superficial também é também zona de interesse para a instalação de turbinas eólicas (CASTRO, 2007).

De acordo com Loredou-Souza *et al.* (2004) *apud* Roballo e Fisch (2008), para ventos com médias horárias acima de 10 m/s, o escoamento é turbulento o suficiente para suprimir os efeitos térmicos, podendo a atmosfera ser considerada neutra.

Além do Comportamento turbulento devido às interações superfície-atmosfera, outro aspecto importante a ser considerado é o cisalhamento do vento. A velocidade do vento é nula a alturas próximas à superfície e aproximadamente geostrófica na atmosfera livre. Na Camada Limite Superficial observa-se um perfil vertical aproximadamente logarítmico, como mostrado na Figura 1.

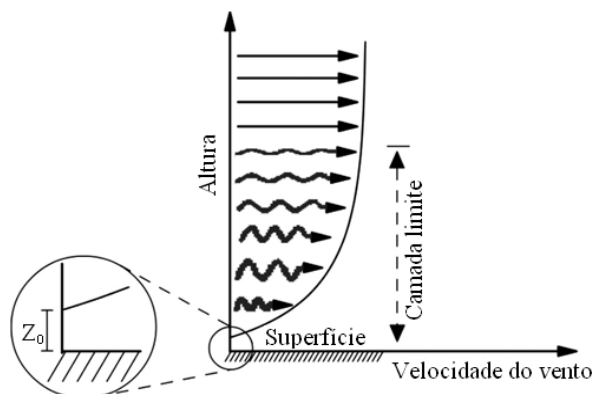


FIGURA 1 - Perfil vertical da velocidade do vento. O comprimento da rugosidade (z_0) é a altura onde a velocidade é nula. Fonte: Adaptada de Martins *et al.* (2008).

Segundo Roballo *et al.* (2009) a descrição do escoamento geralmente é realizada através de perfis de velocidades médias instantâneas locais. Várias leis experimentais permitem efetuar o ajuste de velocidades médias do vento. Duas delas são a Lei Logarítmica e a Lei de Potência. A variação de velocidade média v com a altura z até aproximadamente 100 m acima de uma superfície rugosa pode ser representada pela relação logarítmica, através da expressão:

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

em que v^* é a velocidade de atrito (m/s), k é a constante de Von Karman, cujo valor adotado é geralmente 0,40 e z_0 é o comprimento de rugosidade aerodinâmica (m).

A estimativa de z_0 é realizada através de dados de perfis verticais do vento e extrapolada para a altura em que o vento é nulo. Para regiões de mar aberto e calmo, o parâmetro de z_0 possui valores da ordem de 10^{-4} m, para regiões litorâneas 10^{-3} m, em regiões com muitas árvores e poucas construções ao redor situam-se entre 0,1 a 0,3 m e para regiões de subúrbios e centros urbanos com pouca densidade entre 0,4 e 0,6 m.

A Lei de Potência pode ser definida pela equação (2), em que $U(Z_n)$ e $U(z_r)$ são valores de velocidade médias correspondentes, respectivamente, a uma altura Z_n e a uma altura referência z_r :

$$\frac{U(z_r)}{U(Z_n)} = \left(\frac{z_r}{Z_n} \right)^\alpha \quad (2)$$

2.2 Estudos relacionados ao tema

Fisch (1999) realizou um trabalho, no qual é apresentado um levantamento preliminar da turbulência atmosférica no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), visando aplicações de projeto & desenvolvimento e lançamento de foguetes. O perfil do vento segue o comportamento logarítmico, sendo que os ventos são mais intensos na época seca. Os dados utilizados neste estudo foram coletados por uma torre anemométrica (TA) de 70 metros de altura, com sensores de velocidade (do tipo *propeller*) e direção do vento (do tipo *aeronave*) da R. M. Young (Traverse City, USA), instalados nos níveis de 6,0 (nível 1), 10,0, 16,3, 28,5, 43,0 e 70,0 metros (nível 6) e distante 50 metros da costa.

Adicionalmente, o objetivo foi estudar a estrutura da turbulência atmosférica na região do CLA através de análises relativas ao perfil da velocidade do vento, ventos máximos e intensidade turbulenta e também através de parâmetros de engenharia (picos de rajadas, amplitudes máximas e instantâneas) usualmente utilizados para a determinação de esforços estruturais devido aos ventos.

Concluiu que existem diferenças significativas entre as velocidades do vento dos períodos chuvoso e seco, e também pequenas diferenças entre as velocidades do vento, considerando-se períodos diurno e noturno e que as análises da influência do vento em estruturas verticais devem ser feitas, considerando-se vários parâmetros descritos e não somente um deles, pois o acoplamento do escoamento atmosférico é complexo e estes indicadores, individualmente, não medem perfeitamente a turbulência.

Sá *et al.* (2001) utilizaram um modelo estatístico para estudar a distribuição dos incrementos de velocidade do vento medidos da camada limite superficial na região do Pantanal, em uma torre micrometeorológica durante a campanha experimental IPE-2 (Experimento Integrado do Pantanal), na estação seca. Os dados foram medidos com um anemômetro sônico colocado a uma altura de 24 metros, a uma taxa de amostragem de 60 Hz.

Adicionalmente, os autores objetivavam determinar as características de ambos os sinais, original e filtrado. Para analisar os dados, foram calculadas as funções densidade de probabilidade (PDFs) para diferenças de velocidade do vento obtidas para diferentes incrementos r . No estudo verificou-se que, para o sinal residual os resultados das funções de densidade de probabilidade mostraram uma boa concordância com os modelos teóricos, o que não ocorre com a parte intermitente do sinal.

Silva e Lyra (2004) realizaram um trabalho onde são discutidos alguns aspectos que determinam as características termodinâmicas da Camada Limite Superficial sobre dois tipos de superfície, floresta nativa e pastagem, em duas situações, estação seca e estação chuvosa. Na estação seca foram utilizados os dados do experimento RBLE3/1994 (*Rondonia Boundary Layer Experiment*). No caso da estação chuvosa os dados são provenientes da campanha, LBA/TRMM Wet Season 1999 (*Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia / Tropical Rain Measurement Mission*).

Com o estudo acima citado, os resultados mostraram que o desmatamento acarreta modificações nas características da CLS, tanto na estação seca como na chuvosa. Os padrões de evolução do crescimento (espessura), temperatura, umidade e vento são mais parecidos durante a estação chuvosa. A menor rugosidade na pastagem contribui para o aumento do vento, mas o movimento ascendente mais intenso (mais convecção) diminui este efeito.

Roballo e Fisch (2008) no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) investigaram o escoamento atmosférico através de análises de perfis de vento,

sendo os dados coletados através de sensores de direção e velocidade do vento, instalados em uma torre anemométrica (TA) com 6 níveis de medidas (6, 10, 16, 28, 43 e 70 m), no período de 1995 a 1999. Um conjunto de dados adicional (anos de 2004 e 2005) foi também utilizado para as análises de validação.

Do estudo acima citado, os autores determinaram a velocidade de atrito e o comprimento de rugosidade (z_0) – que compõem o perfil logarítmico do vento – e o expoente α da Lei de Potência do vento, que caracterizam o escoamento atmosférico.

Os resultados mostraram que a velocidade de atrito para o período chuvoso foi determinada como sendo de $0,32 \pm 0,13$ m/s ($0,46 \pm 0,11$ m/s); enquanto z_0 obteve o valor de $0,19 \pm 0,32$ m ($0,06 \pm 0,05$) no período seco. Portanto, o perfil logarítmico do vento apresenta parâmetros sazonais, que dependem das condições de tempo (seco ou chuvoso) e que estão associadas a uma intensificação da velocidade do vento.

Santos (2008) apresentou uma análise de três conjuntos de dados (MCGA – ECHAM4.5, MRE – RSM97 e Reanalysis) de velocidade e direção do vento, no período de janeiro a junho para os anos de 1971 a 2000 para a região próxima ao município de Icapuí/CE. As análises dos dados de velocidade e direção do vento foram realizadas através de comparação quantitativa entre as médias mensais e climatológicas de cada um dos conjuntos de dados e dos conjuntos entre si, e através da comparação de índices estatísticos que representam a variância e o erro quadrático médio das séries de dados, e pelo coeficiente de correlação obtido entre elas.

No estudo acima, verificou-se que no ano de 1983, considerado ano seco associado a um fenômeno El Niño os dados de velocidade média dos ventos foram superiores aos valores encontrados para 1985, considerado ano chuvoso, associado a um fenômeno La Niña. O autor concluiu que as maiores correlações encontradas foram para o par de dados ECHAM-4.5/Reanalysis, tanto para o ano chuvoso, quanto para o ano seco.

Vieira (2008) realizou estudo onde buscou estimar os recursos eólicos em uma região fazendo uso do modelo numérico computacional mais utilizado para este cálculo, o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*).

O autor propõe neste trabalho, analisar a sensibilidade do modelo WAsP à modificação do Parâmetro fluxo de calor superficial, que afeta os resultados e é utilizado para corrigir os efeitos de estabilidade nos dados de entrada, avaliando a representatividade do uso dos valores padrões desse parâmetro na região do Nordeste do Brasil. Assim, calculou o fluxo de calor sensível a partir dos dados provenientes do projeto SONDA do INPE, por dois métodos diferentes: gradiente de Richardson; e considerando a estratificação da atmosfera neutra. Em seguida, analisou-se a sensibilidade do modelo e fez-se a estimativa do parâmetro de fluxo de calor superficial que melhor reproduz os dados de vento medidos em duas torres anemométricas: São João do Cariri (SCR) e Canoa Quebrada (CQ).

Os resultados mostraram que se obteve menores erros adotando valores dos valores do fluxo de calor superficial médio entre 0 W/m^2 25 W/m^2 , e sua variabilidade no intervalo entre 0 W/m^2 50 W/m^2 nas duas regiões. A densidade de potência eólica simulada pelo WAsP, utilizando os valores ótimos obtidos, diminuiu o erro, em relação aos valores do modelo, em aproximadamente 5,3% no nível de 50 metros em SCR, e em aproximadamente 0,44% no nível de 60 metros em CQ.

Lima (2008) investigou a aplicação de distribuição de frequência, especialmente das distribuições de Weibull, de Rayleigh e Log-Normal, para obtenção de um ajuste de curva, bem como para a determinação dos valores de densidade de potência eólica, relacionados aos dados de vento observados na região Jaguaruana do Estado do Ceará.

No estudo acima citado, o autor concluiu que a distribuição de Weibull foi a que melhor se ajustou aos dados calculados pelo método de Máximo Teórico, obtendo satisfatória estimativa da densidade de potência eólica para a região em estudo. A distribuição de Rayleigh obteve valores muito inferiores e a distribuição

Log-Normal obteve valores superiores aos encontrados pelo método de Máximo Teórico.

Roballo e Fisch (2009) em outro trabalho de investigação do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), agora através de simulações em túnel de vento (TV) do CTA/ITA, na escala geométrica 1:1000, mostraram que os parâmetros calculados no experimento no túnel de vento (v^* , z_0 , α) apresentaram-se maiores do que os observacionais na posição em que estaria localizada a TA no CLA. Assim, concluíram que os altos valores de z_0 na posição da TA estão relacionados ao baixo número de Reynolds obtido no túnel de vento, o que faz a região de recirculação se prolongar comparado com a situação real.

Magalhães (2009) apresentou uma análise quantitativa dos regimes de vento observados, bem como a validação da metodologia de aplicações de distribuições estatísticas (Weibull e Log-Normal) para obtenção de ajustes de curva, aos dados de velocidade do vento, e a densidade de potência eólica, em regiões litorâneas do Estado do Ceará. Foram usados dados de velocidade e direção do vento, em superfície (10 metros), coletados pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) de propriedade da FUNCEME.

No estudo acima citado, os resultados mostraram que, para todas as regiões investigadas, se tem aumento da velocidade média mensal do vento no período seco e diminuição da velocidade do vento no período chuvoso. O autor concluiu que a distribuição de Weibull apresenta melhor ajuste de curva e pode ser usada para estimar a densidade de potência eólica nessas regiões.

Lira (2009) em estudo que trata da estimativa de recursos eólicos no litoral cearense usando a teoria de regressão linear apresenta estimativas de valores de velocidade média do vento em altitude para as regiões de Paracuru e Camocim a partir de dados observados em superfície em São Gonçalo do Amarante e Barroquinha.

Adicionalmente, o autor caracterizou as regiões a partir do perfil diário e mensal da velocidade média do vento obtidos dos dados das respectivas

Plataformas de Coleta de Dados (PCD) e de Torres Anemométricas (TA) nessas regiões. Daí, utilizando-se a equação do perfil logarítmico do vento e os valores da velocidade em superfície foram estimados os valores da velocidade do vento em altitude para 20, 40 e 60 metros nas regiões das TAs. Em seguida o autor usou o modelo de regressão linear para estimar novos valores de velocidade média em altitude, e assim, realizou comparações com as series de dados observados.

O estudo mostrou que a metodologia usada apresentou desempenho satisfatório e que confirmou que as regiões em estudo são potencialmente favoráveis ao aproveitamento da energia eólica.

3 METODOLOGIA E DADOS

3.1 Localização geográfica da região de estudo

Nesse estudo foram usados dados de velocidade do vento de duas cidades: Barroquinha e Camocim (ver localização geográfica na Figura 2). Os dados de Barroquinha foram obtidos na Plataforma de Coleta de Dados (PCD) monitorada pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), localizada nas seguintes coordenadas $2^{\circ}55' 48,2''S$ e $41^{\circ} 7' 7,3''W$ e de Camocim foram obtidos na Torre Anemométrica (TA) de propriedade da Secretaria de Infra-Estrutura do Ceará (SEINFRA/CE), localizada nas seguintes coordenadas $02^{\circ} 51' 56,7''S$ e $40^{\circ} 53' 09,2''W$. O anemógrafo usado para medição na TA possui uma taxa de amostragem de 0,5 Hz e foi programado para realizar registros em intervalos de 10 minutos.

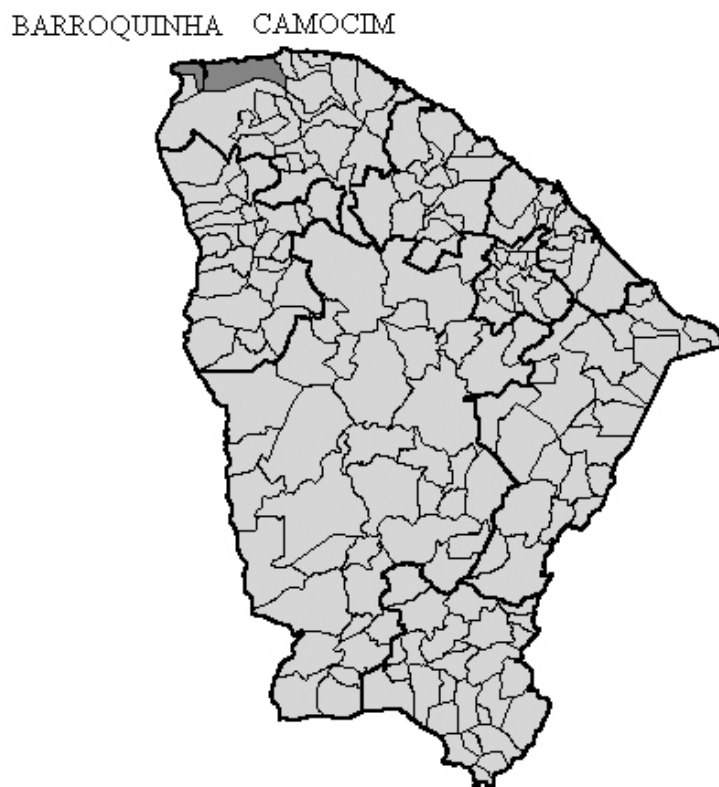


FIGURA 2 – Mapa do Estado do Ceará com destaque para as áreas de estudo, os municípios de Barroquinha e Camocim. Fonte: Adaptada de Magalhães (2009).

3.2 Base de dados e correção de falhas

A PCD possui sensores que registram as velocidades dos ventos a uma altura de 10 metros. Já a TA possui sensores que registram as velocidades em três níveis 20, 40 e 60 metros. Os sensores da PCD registram os dados de velocidade do vento de hora em hora, já os sensores da TA registram os dados em intervalos de 10 minutos. Esses dados de velocidade foram utilizados para o levantamento das médias mensais, nas duas regiões de estudo.

Os dados usados nesse estudo são do período de 1º de setembro de 2004 a 31 de agosto de 2005 tanto na PCD de Barroquinha quanto na TA de Camocim.

Vale ressaltar que os dados brutos da PCD apresentavam inexistência de valores de velocidades em alguns dias nos meses de maio, junho e julho de 2005. A correção dessas falhas se deu através do método de correções de falhas, baseado no algoritmo de Markov, existente no software Windographer®. Esta técnica pode preencher várias falhas e erros nas medições em até vários dias, assim, corrigem-se tais falhas com dados gerados que possuem propriedades estatísticas semelhantes aos dados medidos.

Em seguida foram estimadas as velocidades do vento em altitude com uso do Windographer®, que para tal função usa a formulação matemática do perfil logarítmico do vento, que por sua vez é parte da teoria da CLS. Dessa forma, foram estimados dados de velocidade média do vento para as alturas de 20, 40 e 60 metros a partir dos dados observados na PCD de Barroquinha. Tais velocidades foram calculadas inicialmente usando três valores de parâmetro de rugosidade, 0,01m, 0,1m, 1,0 metro e, por ultimo, com parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros. Valor que minimiza os erros encontrados na comparação das séries de dados estimados e observados.

3.3 Parâmetro de rugosidade

Segundo Priestley (1959) *apud* Varejão-Silva (2006) fisicamente o parâmetro de rugosidade traduz a rugosidade aerodinâmica da superfície subjacente

ao vento e, em geral, possui uma ordem de magnitude menor que a da altura real da rugosidade da superfície.

De acordo com Silva (2009) a rugosidade do terreno é identificada através do comprimento da rugosidade z_0 . O parâmetro z_0 é uma escala de comprimento utilizada para caracterizar a rugosidade do terreno e está associado à altura onde a velocidade média se anula, se o perfil de velocidade varia logaritmicamente com a altura. Dessa forma, a cada tipo de terreno atribuem-se uma classe de rugosidade e um comprimento de rugosidade z_0 . Como exemplo, $z_0 \approx 0,001$ metros quando a superfície é lisa (como areia, neve e água), $z_0 = 0,20$ metro quando se tem árvores e arbustos e $z_0 = 0,5$ metro quando se trata de áreas residenciais.

Os dados de velocidades para as alturas de 20, 40 e 60 metros foram primeiramente calculados usando z_0 padrão do Windographer® igual a 0,01 metros. Depois foram calculadas duas novas medidas de velocidades usando valores de z_0 iguais a 0,1 e 1,0 metro.

Também usando o software Windographer® foi calculado o perfil de velocidade média do vento utilizando parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros, nas alturas de 20, 40 e 60 metros, e em seguida foi feita uma comparação com a série de dados observados na TA de Camocim nas mesmas alturas.

Em seguida, calculou-se a correlação estatística dos dados estimados a partir dos dados da PCD com os dados da TA para os três níveis de altura e para os quatro valores de z_0 . Além da correlação, calculou-se o erro quadrático médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE), o erro absoluto (*Mean Absolute Error* – MAE) e erro relativo ou erro percentual (ϵ).

3.4 Erro absoluto, erro relativo e erro quadrático médio

O erro absoluto (MAE) é dado por:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - o_i|}{n} \quad (3)$$

O erro relativo ou erro percentual (ε) por:

$$\varepsilon = 100\% \cdot \frac{(p_i - o_i)}{o_i} \quad (4)$$

E o erro quadrático médio (RMSE) é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Onde p_i é o valor estimado, ou seja, o valor obtido pelo Windographer[®], e o valor observado é o_i , ou seja, o valor medido na TA, e n é o número de observações.

Segundo (Zacharias, Heatwole e Coakley, 1996) *apud* Carvalho (2008) o MAE indica afastamento médio absoluto dos valores previstos em relação aos valores observados. O RMSE mede a variação dos valores estimados ao redor dos valores medidos. E o ε indica o desvio médio dos valores previstos em relação aos valores observados.

3.5 Coeficiente de correlação e coeficiente de determinação

O coeficiente de correlação é dado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 \cdot (o_i - \bar{o})^2}} \quad (6)$$

Onde p_i é o valor estimado e \bar{p} é média dos valores estimados, o valor observado e a média dos valores observados são respectivamente, o_i e \bar{o} .

Segundo Devore (2006), quando $0 \leq |r| \leq 0,5$ a correlação é considerada fraca, forte se $0,8 \leq |r| \leq 1$ e moderada em caso contrário.

O coeficiente de determinação é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação. O coeficiente de determinação é uma medida da proporção de variabilidade em variável que é explicada pela variabilidade da outra.

3.6 O Software Windographer®

O Windographer® é uma ferramenta para análise de dados de vento. Este software é utilizado para tratamento de dados coletados de estações meteorológicas de superfície, como PCDs. Através do Windographer® é possível avaliar, por exemplo, a intensidade e a direção predominante dos ventos num determinado período e obter o perfil diário, mensal ou anual da sequência de dados.

O software pode exibir diversos gráficos e tabelas como do perfil logarítmico do vento, direção dos ventos, médias mensais e diárias a partir desses dados, como pode ser visto na Figura 3.

Com o Windographer® também é possível realizar a simulação de velocidades dos ventos em diversas alturas a partir de um pacote de dados medidos em uma única altura.

O perfil logarítmico do vento pode ser calculado utilizando a fórmula do Perfil Logarítmico informando o parâmetro de rugosidade e também pode ser calculado utilizando a fórmula da Lei de Potência informando o expoente da lei de Potência.

É possível ainda tratar outras séries de dados como temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação solar. O software foi desenvolvido por Mistaya Engenharia INC e é disponibilizada gratuitamente uma versão de teste válida por um período de 60 dias.

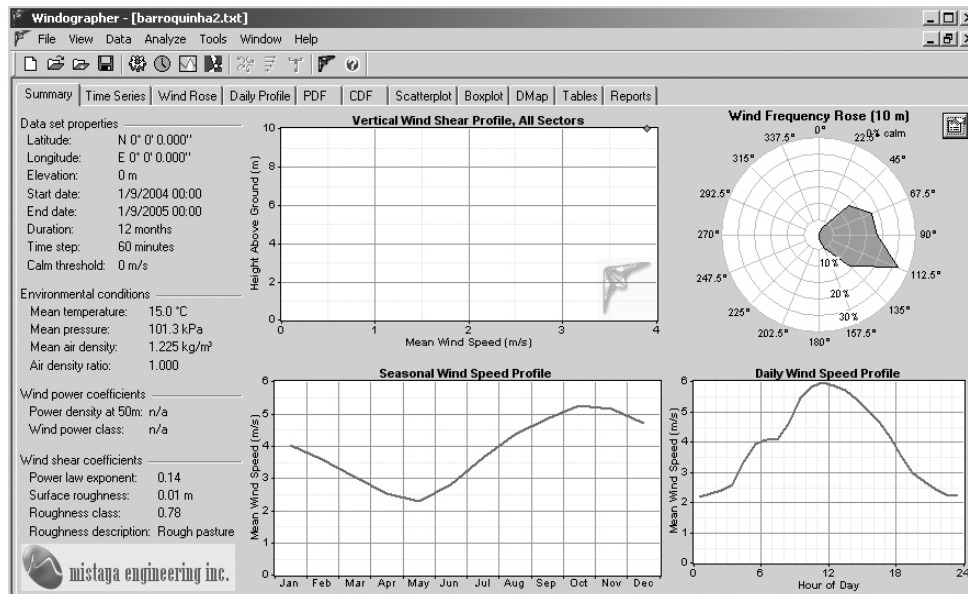


FIGURA 3 – Interface gráfica do software Windographer®, mostrando a direção do vento, dados mensais e diários da velocidade do vento e informações como o parâmetro de rugosidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Velocidade do vento observado e estimativa em altitude

A Figura 4 mostra o perfil médio mensal da velocidade do vento observado na Plataforma de Coleta de Dados (PCD) de Barroquinha no período de setembro de 2004 a agosto de 2005.

Os resultados mostram que os maiores valores de velocidade média do vento, coincidem com a estação seca da região, e no período compreendido entre os meses de fevereiro e maio do ano de 2005 são observados os menores valores, coincidindo com a estação chuvosa, concordando com o exposto no estudo de Lira (2009).

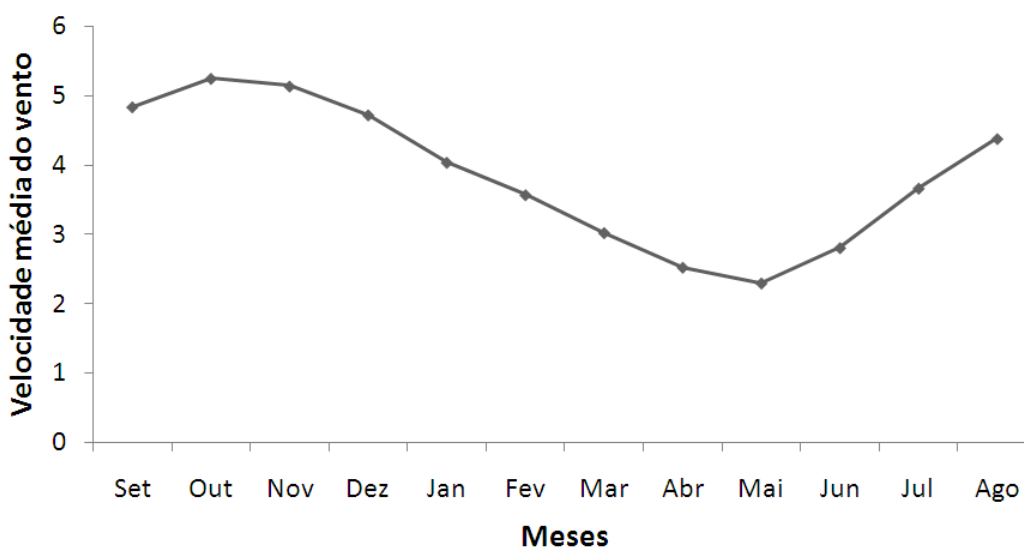


FIGURA 4 – Médias mensais da velocidade do vento na PCD de Barroquinha.

A Figura 5 mostra o perfil médio mensal da velocidade do vento na Torre Anemométrica (TA) de Camocim. As maiores velocidades média ocorrem no mesmo período que em Barroquinha, ou seja, de setembro a dezembro do ano de 2004, estação seca da região e as menores velocidades médias ocorrem no mesmo período que em Barroquinha, ou seja, de fevereiro a maio de 2005, estação chuvosa da região, também, concordante com Lira (2009).

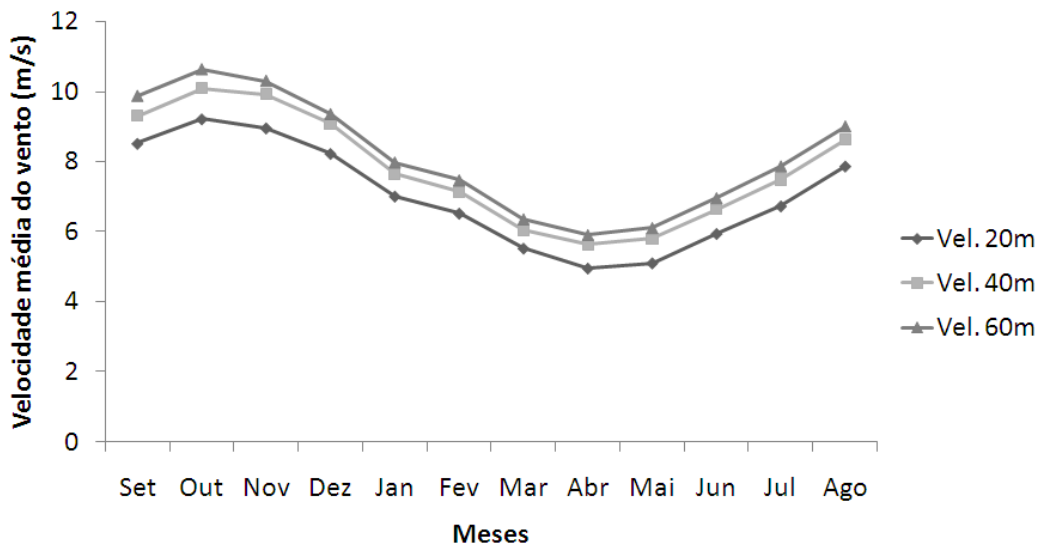


FIGURA 5 – Médias mensais da velocidade do vento na TA de Camocim nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005.

A Figura 6 mostra o perfil médio mensal das velocidades do vento estimado, a partir dos dados coletados na PCD de Barroquinha com parâmetros de rugosidade iguais a 0,01, 0,1 e 1,0 metros, utilizando software gráfico Windographer® que usa a formulação do perfil logarítmico, para a altura de 20 metros.

Em adição, na Figura 6 é mostrada a comparação entre as séries de dados estimados e os observados na TA de Camocim. Nesta figura observa-se que existe concordância entre os dados obtidos com a variação do parâmetro de rugosidade e os observados na TA de Camocim, na altura de 20 metros. Observa-se que os dados estimados pelo software subestimam os dados observados na TA.

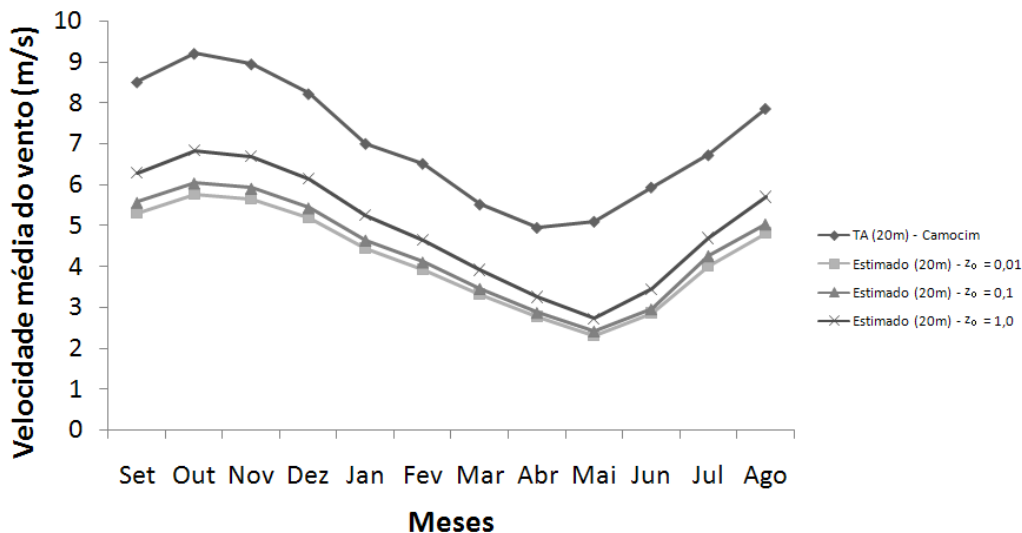


FIGURA 6 – Velocidades médias do vento na altura de 20 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro.

Na Figura 7 tem-se a comparação entre as séries estimados, e os dados observados na TA, para a altura de 40 metros. Menciona-se que, novamente foi observado que os dados estimados subestimam a série de dados observados na TA.

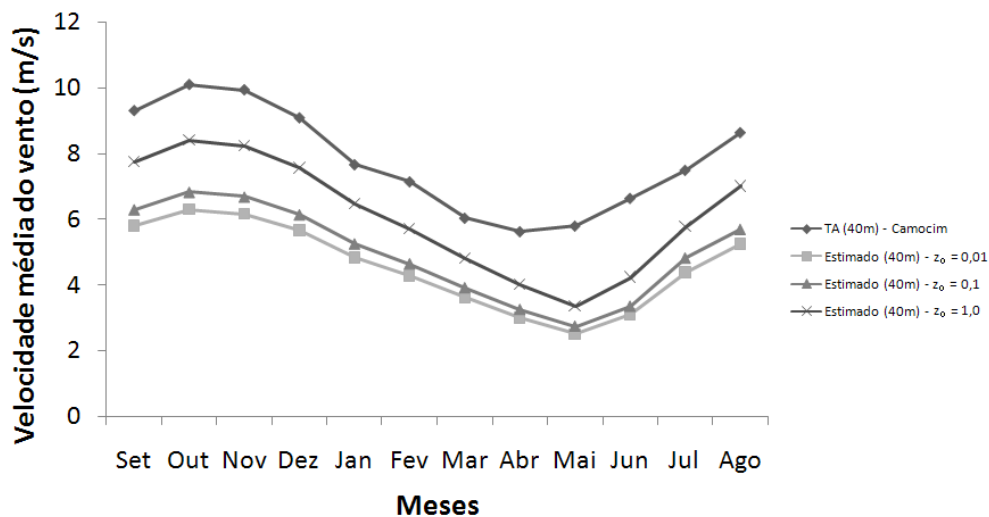


FIGURA 7 – Velocidades médias do vento na altura de 40 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro.

A Figura 8 mostra a comparação entre as séries de dados estimados e os observados na TA de Camocim, na altura de 60 metros. Assim, pode-se observar

que, como nas situações anteriores a série de dados estimados apresenta valores menores que os respectivos da série de dados observados na TA.

Adicionalmente, menciona-se que para as três alturas investigadas tem-se melhores resultados das estimativas, ou seja, menores erros absolutos, quando usa-se parâmetro de rugosidade igual a 1,0 metro.

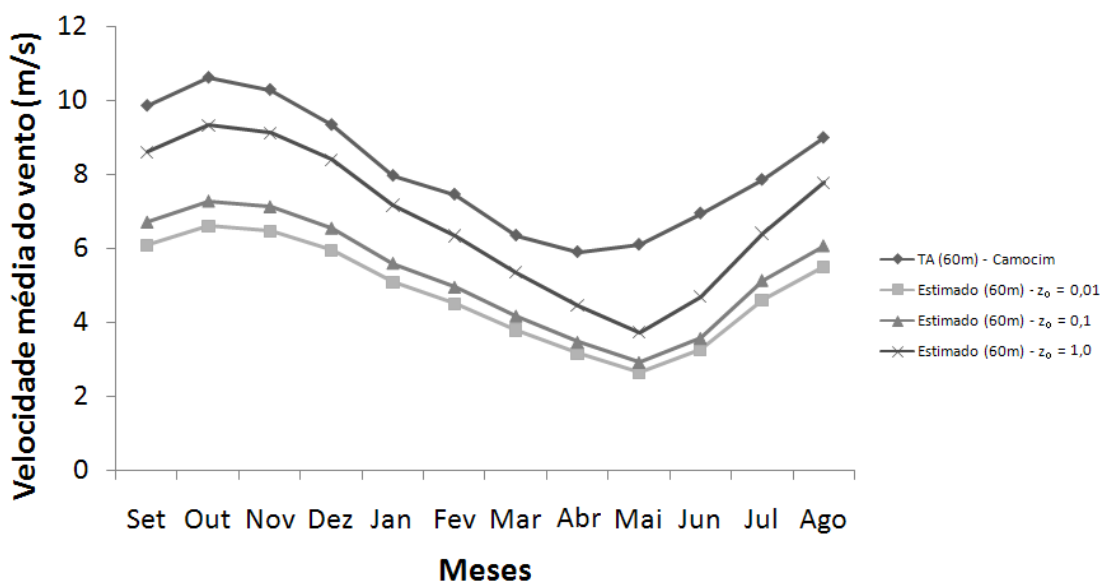


FIGURA 8 – Velocidades médias do vento na altura de 60 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro.

Para a quantificação dos erros entre as séries de dados estimadas e observadas optou-se pelo cálculo do Erro Médio Quadrático (RMSE), o Erro Absoluto Médio (MAE) e o erro percentual (ϵ), calculou-se ainda o coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R^2), todos mostrados na Tabela 1.

Para as estimativas a 20 metros de altura os menores valores de RMSE, MAE e ϵ foram respectivamente 2,10 m/s, 2,08 m/s e 0,30%, todos registrados para a comparação entre os dados estimados e os observados usando rugosidade 1,0 m. Ainda nessa altitude, o coeficiente de correlação foi de 0,98 para todos os parâmetros de rugosidade e o coeficiente de determinação foi de 0,96.

Nas estimativas a 40 metros, os menores valores de RMSE, MAE e ϵ foram respectivamente, 1,72 m/s, 1,68 m/s e 0,23%, todos registrados para a

comparação entre os dados estimados e os observados utilizando rugosidade 1,0 m, onde foi registrado coeficiente de correlação 0,98 e coeficiente de determinação 0,94.

Na altura de 60 metros, os menores valores de RMSE, MAE e ϵ foram respectivamente, 1,44 m/s, 1,37 m/s e 0,18%, todos registrados para a comparação entre os dados estimados e os observados utilizando novamente rugosidade 1,0m. Foi registrado coeficiente de correlação 0,97 e coeficiente de determinação 0,94.

Vale ressaltar que foram registrados menores erros quando visto apenas as médias mensais, mas devido a falhas nos dados da PCD de Barroquinha nos meses de maio, junho e julho de 2005, os erros para o período investigado sofreram significativo aumento.

TABELA 1 – Valores dos erros e coeficientes de correlação e determinação entre os dados estimados, a partir dos dados da PCD e os dados observados na TA de Camocim.

Altura (m)	Parâmetro de rugosidade (m)	RMSE (m/s)	MAE (m/s)	ϵ (%)	r	R ²
20	0,01	2,87	2,84	0,41	0,98	0,96
	0,1	2,67	2,65	0,39	0,98	0,96
	1,0	2,10	2,08	0,30	0,98	0,96
40	0,01	2,85	3,21	0,42	0,97	0,94
	0,1	2,85	2,82	0,37	0,97	0,94
	1,0	1,72	1,68	0,23	0,98	0,96
60	0,01	3,37	3,34	0,42	0,97	0,94
	0,1	2,87	2,85	0,36	0,97	0,94
	1,0	1,44	1,37	0,18	0,97	0,94

4.2 Estimativa da velocidade média do vento em altitude com z_0 igual a 1,90 metros

A Figura 9 mostra a comparação entre os dados de velocidade média do vento observados na Torre anemométrica (TA) de Camocim e os dados estimados pelo software Windographer® a partir dos dados de 10 metros da Plataforma de Coleta de dados (PCD) de Barroquinha com parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros, na altura de 20 metros. Pode-se observar que a série de dados estimados segue a série de dados observados, porém, ainda apresenta subestimativas dos valores observados.

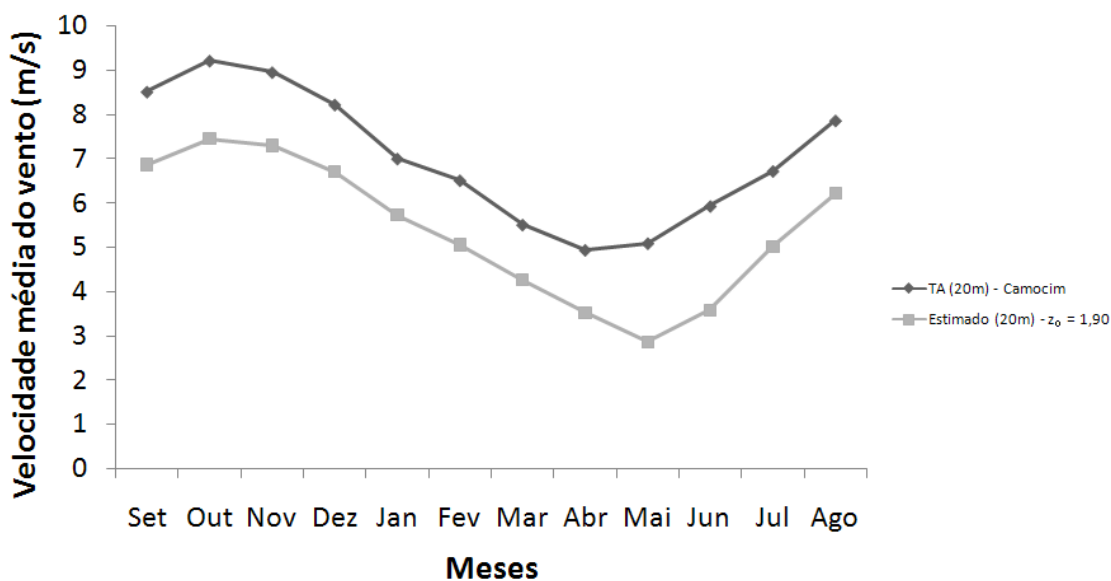


FIGURA 9 – Velocidades médias do vento na altura de 20 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetro de rugosidade 1,90 metros.

Na Figura 10, tem-se a comparação entre as séries de dados estimados e os observados na TA de Camocim, para a altura de 40 metros. Os resultados mostram a proximidade entre as duas séries de dados, até próximo aos meses de maio, junho e julho, que por falhas nos dados da PCD ocasionaram esse maior erro na comparação.

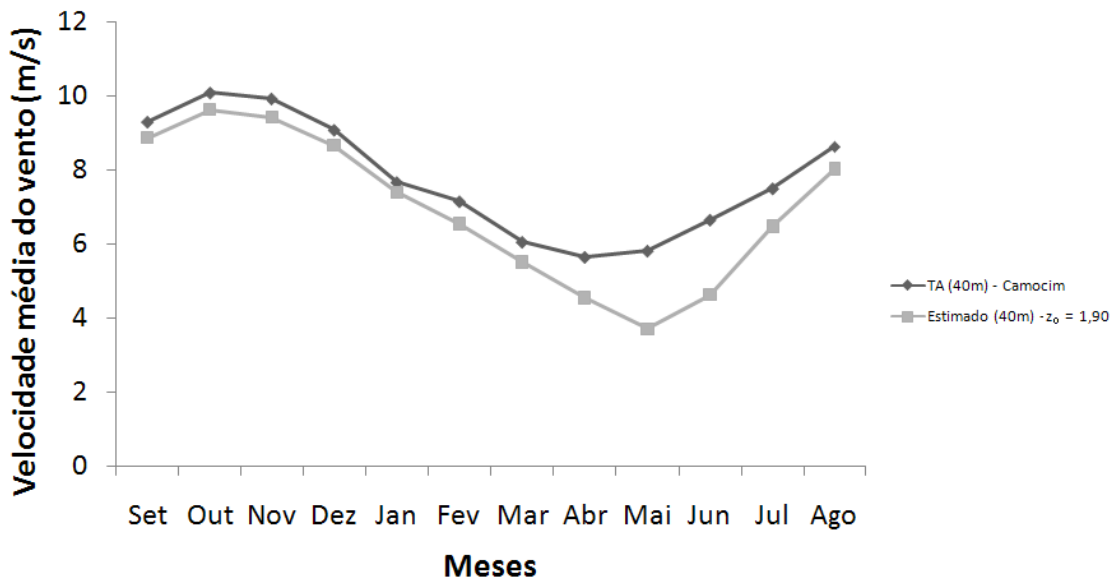


FIGURA 10 – Velocidades médias do vento na altura de 40 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros.

A Figura 11 mostra a comparação os dados estimados e observados na altura de 60 metros. Pode se observar que, para esse caso tem-se uma pequena superestimativa entre os meses de setembro de 2004 a fevereiro de 2005 e subestimativas nos meses de maio de 2005 a julho de 2005. Esse fato é devido as falhas encontradas nos dados observados, mencionadas anteriores.

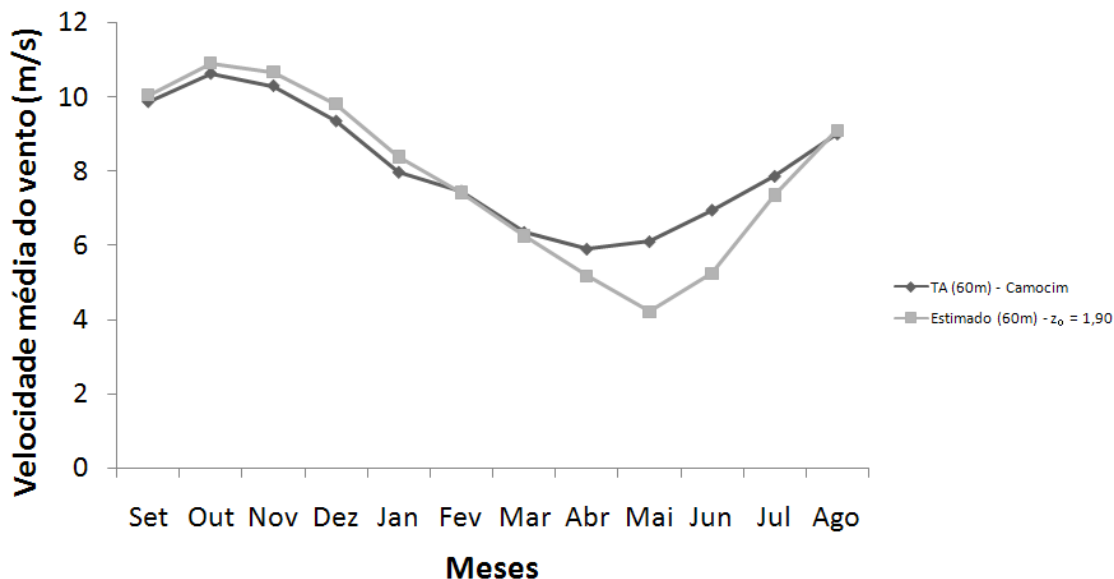


FIGURA 11 – Velocidades médias do vento na altura de 60 metros, nos meses de setembro de 2004 a agosto de 2005, com parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros.

Para a quantificação dos erros entre as séries de dados estimadas e observadas optou-se pelo cálculo do Erro Médio Quadrático (RMSE), o Erro Absoluto Médio (MAE) e o erro percentual (ϵ), calculou-se ainda o coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R^2), todos mostrados na Tabela 2.

Na altura de 20 metros os valores registrados de RMSE, MAE e ϵ foram respectivamente, 1,70 m/s, 1,16 m/s e 0,24% e os valores dos coeficientes de correlação e determinação iguais a 0,98 e 0,95. Nesse caso o método utilizado explica 95% da variabilidade da velocidade média do vento observada.

Para a altura de 40 metros os valores registrados de RMSE, MAE e ϵ foram respectivamente, 1,02 m/s, 0,83 m/s e 0,11% e os valores dos coeficientes de correlação e determinação iguais a 0,97 e 0,94. Nesse caso, o método utilizado explica 94% da variabilidade da velocidade média do vento observada.

Para a altura de 60 metros os valores registrados de RMSE, MAE e ϵ foram respectivamente, 0,82 m/s, 0,27 m/s e 0,03% e os valores dos coeficientes de correlação e determinação iguais a 0,97 e 0,94. Nesse caso, o método utilizado explica 94% da variabilidade da velocidade média do vento observada.

Como visto os menores erros foram encontrados para a altitude de 60 metros fazendo com que se aproximasse mais dos dados da TA de Camocim na mesma altitude.

O uso do parâmetro de rugosidade considerado ótimo diminuiu consideravelmente os erros na comparação entre os dados de velocidade média da PCD de Barroquinha e os dados de velocidade média da TA de Camocim.

TABELA 2 – Estimativa de erros entre as velocidades médias na TA de Camocim e as velocidades médias estimadas a 20, 40 e 60 metros utilizando rugosidade 1,90 metros.

Altura (m)	Parâmetro de rugosidade (m)	RMSE (m/s)	MAE (m/s)	ϵ (%)	r	R²
20	1,9	1,70	1,67	0,24	0,98	0,96
40	1,9	1,02	0,83	0,11	0,97	0,94
60	1,9	0,82	0,27	0,03	0,97	0,94

5 CONCLUSÃO

Nesse estudo, teve-se como objetivo estimar as médias mensais da velocidade do vento para as alturas de 20, 40 e 60 metros, a partir dos dados observados na PCD de Barroquinha, na altura de 10 metros, usando o software gráfico Windographer[®], no qual é possível variar o valor do parâmetro de rugosidade.

Conclui-se que para as alturas de 20, 40 e 60 metros utilizando parâmetros de rugosidade 0,01, 0,1 e 1,0 metro, se obteve séries de dados estimados concordantes com as séries de dados observados, visto que os valores dos coeficientes de correlação e determinação foram próximos de um (1,0), o que representa uma forte correlação entre as séries de dados (DEVORE, 2006).

No entanto, mesmo com a obtenção desses resultados foram quantificados altos valores para os erros calculados. Isso se deve em parte a falhas nos dados coletados na PCD de Barroquinha nos meses de maio, junho e julho de 2005.

Utilizando-se o parâmetro de rugosidade igual a 1,90 metros foram obtidos os melhores resultados, tanto para a altura de 20 metros como para 40 metros, com coeficientes de correlação estatística entre 0,97 e 0,98 e coeficiente de determinação entre 0,94 e 0,96.

No entanto, para a altura de 60 metros obteve-se superestimação dos valores observados nos meses de setembro de 2004 a janeiro de 2005, e novamente foi observado maiores erros nos meses de maio, junho e julho de 2005.

Assim, conclui-se que, em geral, usando-se a metodologia adotada nesse estudo, para todos os casos investigados se tem concordâncias entre as séries de dados estimados e observados, com fortes coeficientes de correlação estatística, e que com o parâmetro de rugosidade 1,90 metros minimizaram-se os erros obtidos na comparação entre essas séries de dados, apesar de apresentar pequenas superestimativas para a altura de 60 metros.

Como trabalhos futuro podem ser realizados estudos em outras regiões como por exemplo: serras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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_carvalheiro.pdf>. Acesso em: 18 janeiro 2010.

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

FISCH, Gilberto. **Características do Perfil Vertical do Vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA)**. Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, v.14, n.1, 11-21, 1999.

LIMA, Francisco José Lopes de; **Avaliação da Aplicação das Distribuições de Probabilidade de Weibull, de Rayleigh e Log-Normal para Obtenção de Densidade de Potencia Eólica na Região Jaguaruana/CE: Estudo de Casos para os Anos de 2004 e 2005**. Monografia apresentada ao Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará. 2008.

LIRA, Marcos Antônio Tavares. **Estimativa dos Recursos Eólicos no Litoral Cearense Usando a Teoria da Regressão Linear**. Universidade Estadual do Ceará, 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas).

MAGALHÃES, Rafael Aragão; **Aplicação Estatística para Obtenção da Densidade de Potência Eólica em Regiões do Litoral Cearense**. Monografia apresentada ao Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará. 2009.

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.

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, 510-519, dezembro, 2008.

ROBALLO, Suelen T., FISCH, Gilberto, GIRARDI, Roberto da Mota. **Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): parte 2 – ensaios em túnel de vento**. Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, v.24, n.1, 87-99, março, 2009.

SÁ, L. D. A. et al. **Análise da Interferência no Subdomínio Inercial da Turbulência Desenvolvida Acima do Pantanal Mato-Grossense (Experimento IPE-2)**. Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, v. 16, n.1, 41-49, 2001.

SILVA, Ana Elizabete da, LYRA, R. F. F. **Alguns Aspectos da Camada Limite Superficial no Oeste da Amazônia, em Regiões de Floresta Nativa e Pastagem, Durante a Estação Seca (1994) e a Estação Chuvosa (1999)**. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza/CE. Anais do XIII CBMET, 2004. v.1. p.1-15.

SANTOS, Clodoaldo Campos dos. **Análise do Desempenho de um sistema Numérico de Previsão Climática na Quantificação dos Ventos Numa Região Litorânea do Ceará**. Monografia apresentada ao Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará. 2008.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, PE. 2006.

VIEIRA, Cícero Fernandes Almeida. **Sensibilidade do Modelo WAsP aos Efeitos da Estabilidade Atmosférica no Nordeste do Brasil**. Universidade Estadual do Ceará, 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas).