



## Estimativa da densidade de potencial eólico para geração de energia elétrica na região serrana do estado do Ceará

Alice Luna Mesquista<sup>1</sup>, Inaiá Viana de Carvalho<sup>2</sup>, José Sérgio dos Santos<sup>3</sup>, Phylippe Gomes de Lima Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduanda no Curso Superior em Tecnologia em Saneamento Ambiental – IFCE. e-mail: alice.l.m@hotmail.com

<sup>2</sup>Graduanda no Curso Superior em Tecnologia em Gestão Ambiental – IFCE. e-mail: inaiavc@hotmail.com

<sup>3</sup> Professor Doutor do curso Superior em Tecnologia em Saneamento Ambiental - IFCE. e-mail: sergio@ifce.edu.br

<sup>4</sup>Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental – PGTGA – Bolsista CAPES/CNPq. e-mail: phyllipesantos@gmail.com

**Resumo:** O presente trabalho visa quantificar a densidade de potencial eólico de sete municípios da região serrana do Ceará. Foram usados dados das velocidades dos ventos medidos a 10m de altura, coletados pela rede de Plataformas de Coletas de Dados (PCDs) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir destes dados estimaram-se valores de velocidade para as alturas 50m, 80m e 100m e subsequentemente calcularam-se as densidades de potencial eólico e a frequência da velocidade para estas alturas. Observou-se que a Serra da Ibiapaba possui potencial médio de 282,33W/m<sup>2</sup> aproximadamente duas e quatro vezes superior a Serra da Meruoca e a Chapada do Araripe respectivamente. Conclui-se que a densidade de potencial eólico dos municípios da Serra da Ibiapaba é superior quando comparado com a dos outros municípios em estudo. A frequência dos ventos com velocidade entre 2,5m e 28m é bastante considerável, sendo a maioria, na altura de 100m, superior a 70%, o que mostra que a região Serrana cearense possui boas condições de vento para a geração de energia elétrica.

**Palavras - chave:** velocidade do vento, densidade de potencial eólico, frequência de Weibull, Ceará

### 1. INTRODUÇÃO

As discussões a respeito das mudanças climáticas e aquecimento global vêm motivando países a buscarem, incessantemente, adotar práticas em seus mais diversos setores que possibilitem o alcance da sustentabilidade.

O setor mundial de energia é um dos líderes em emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (MACKINSEY&COMPANY, 2009). Esse é um dos motivos pelo qual países desenvolvidos vêm buscando reestruturar suas matrizes energéticas, tornando-as mais limpas, ou seja, menos dependentes dos combustíveis fósseis, principal fonte global de energia.

A energia eólica, energia proveniente da força dos ventos, vem se concretizando como boa alternativa de fonte renovável, dispersando-se cada vez de forma mais rápida pelo mundo. Países desenvolvidos como Alemanha, Espanha e Estados Unidos já possuem uma quantidade significativa de participação de geração de energia eólica em sua matriz energética.

Segundo Mackinsey&Company (2009), a matriz de geração de energia elétrica brasileira é uma das mais limpas do mundo. Com elevada participação de grandes hidrelétricas, que respondem por 85% da energia gerada.

Mesmo com uma matriz diferenciada, visando o crescimento e constante melhoria de desenvolvimento do seu setor energético, o Brasil, seguindo o exemplo dos países desenvolvidos, incentiva por meio de projetos e leis, a exemplo o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o investimento em novas fontes de energia, principalmente proveniente de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e biomassa e a eólica, já que essas são consideradas limpas.

O Nordeste brasileiro vem sendo a região de recepção e maior expansão da fonte eólica, onde destaca-se o estado do Ceará, por ser conhecido por possuir ventos bons e constantes, ou seja, possuir um alto potencial de geração de eletricidade por meio dos ventos. Esse fato é comprovado segundo

notícia do publicada pelo G1 CE (2012) dizendo que, o Ceará é o maior produtor de energia eólica do País.

O Ceará é um estado litorâneo, sendo seus municípios costeiros os mais visados para a implantação de parques eólicos, gerando dessa forma uma concentração desses sítios em uma única região o que gera uma série de problemas sociais e ambientais na área.

Os parques no Estado, além de Aquiraz, eles estão instalados em Aracaraú, Montada, Aracati, Beberibe, Camocim, Paracuru, São Gonçalo do Amarante e Fortaleza, todas as cidades do litoral cearense (G1 CE, 2012), o que comprova tal concentração.

Já sendo perceptível essa problemática de concentração, O litoral do Estado vem deixando de ser o único ponto onde os projetos eólicos são instalados. A região da Ibiapaba é uma nova realidade para os investidores. (SUGETTE, 2011).

Considerando o crescimento e visibilidade da energia eólica e sua presença consistente no estado do Ceará, o presente estudo objetiva quantificar a densidade de potencial eólico da região serrana do estado, ampliando a atração por estudos de viabilidade para implantação de parques eólicos na mesma.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

Os municípios utilizados para esse estudo compõem parte da zona serrana do Estado do Ceará, sendo eles (IPECE, 2011):

- Ubajara, com Temperaturas médias de 24 a 26 °C e Período Chuvoso entre janeiro e abril, e São Benedito com Temperaturas médias de 22 a 24 °C e Período Chuvoso entre janeiro e maio. Ambos os municípios localizados na Serra da Ibiapaba;

- Meruoca com Temperaturas médias de 24 a 26 °C e Período Chuvoso entre janeiro e maio, localizado na Serra da Meruoca;

- Araripe, Santana do Cariri, Crato e Barbalha, com Temperaturas médias de 22 a 24°C, 24 a 26°C, 24 a 26°C e 24 a 26°C, respectivamente, e Período Chuvoso entre janeiro e maio para os 3 primeiros e janeiro a abril para o município de Barbalha. Os 4 municípios localizam-se na microregião do Cariri/Chapada do Araripe.

A Figura 1 mostra a localização dos municípios estudados no Estado do Ceará.

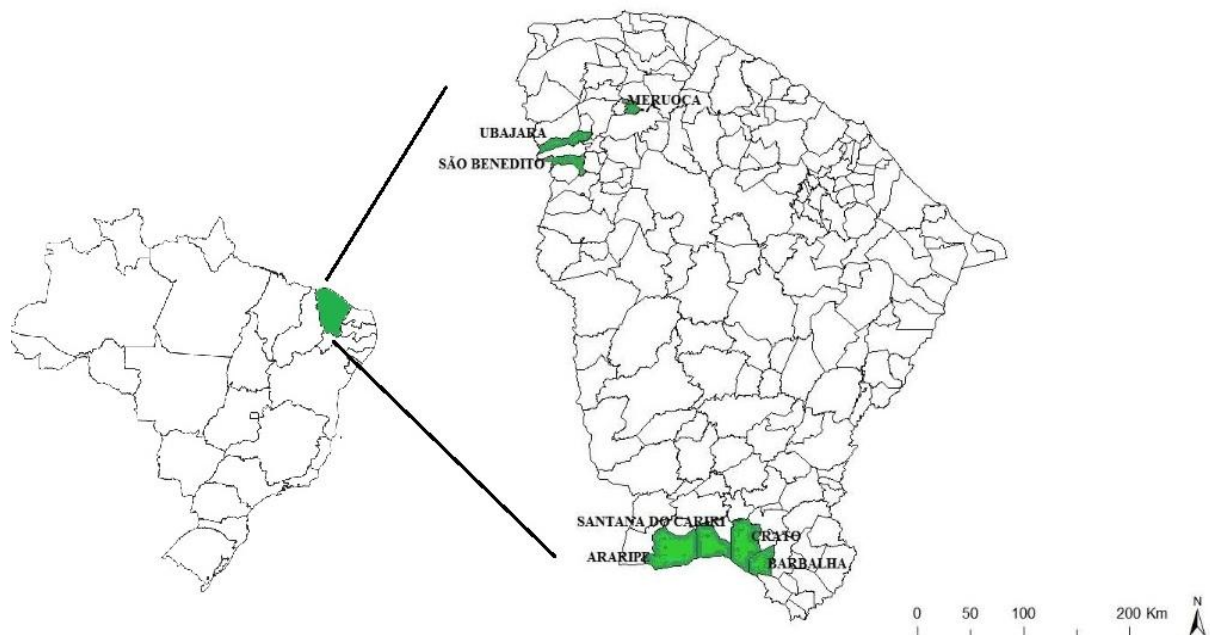


Figura 1: Mapa do Ceará e seus municípios serranos em estudo.

Fonte: Adaptado da Base Cartográfica IBGE (2012)



### Formulação Matemática

Foram utilizados para o estudo os valores das medições de velocidade do vento a dez metros de altura das Plataformas de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes aos sete municípios em estudo. Tais medições são realizadas por anemômetros automaticamente de hora em hora, totalizando 24 medições diárias.

Os dados obtidos foram analisados, sendo desconsiderados possíveis erros e falhas de medição dos anemômetros. Somente foram utilizados os municípios que continham no mínimo um ano de dados válidos, sendo esse o tempo mínimo de monitoramento necessário para analisar a possibilidade de implantação de parque eólico em determinado sítio.

Para o cálculo da densidade de potencial, primeiramente foi preciso calcular a correção do valor da massa específica do Ar ( $\rho$ ). Para tal feito foi utilizada a equação 1 (PATEL, 1999):

$$\rho = \rho_0 - 1,194 \cdot 10^{-4} \cdot H_m \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

$\rho_0$  = Massa específica do ar ao nível do mar (1,225 Kg/m<sup>3</sup>);

$H_m$  = Altitude do local.

As altitudes das cidades foram obtidas através do Perfil Básico Municipal de 2011, onde são disponibilizados indicadores socioeconômicos e geográficos para o Ceará.

Em seguida o valor de cada medição de velocidade do vento ( $V_1$ ) foi elevado ao cubo, e depois foi calculada a média desses. O valor da média dos cubos, a dez metros ( $H_1$ ), foi utilizada na seguinte equação (PATEL, 1999) para calcular a densidade de potencial eólico de cada município:

$$P = 1/2 \rho V^3 \text{ watts/m}^2 \quad [\text{Eq.2}]$$

Para a extrapolação das velocidades para as alturas de 50, 80 e 100 metros ( $H_2$ ), utilizou-se a formulação matemática (QUASCHNING, 2005):

$$(V_1/V_2) = \ln(H_1/Z_0)/\ln(H_2/Z_0) \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde:

$H_1$  = altura do solo no ponto 1(m);

$H_2$  = altura do solo no ponto 2 (m);

$V_1$  = velocidade do vento no ponto 1(m);

$V_2$  = velocidade do vento no ponto 2(m);

$Z_0$  = rugosidade do terreno.

Adequando a fórmula temos que:

$$V_2 = [\ln(H_2/Z_0)/\ln(H_1/Z_0)] \cdot V_1 \quad [\text{Eq. 4}]$$

Para encontrar a rugosidade do terreno utilizou-se o Mapa de rugosidade do Brasil, Figura 2, e observou-se que todos os municípios estudados possuem rugosidade ( $Z_0$ ) igual a 0,1.

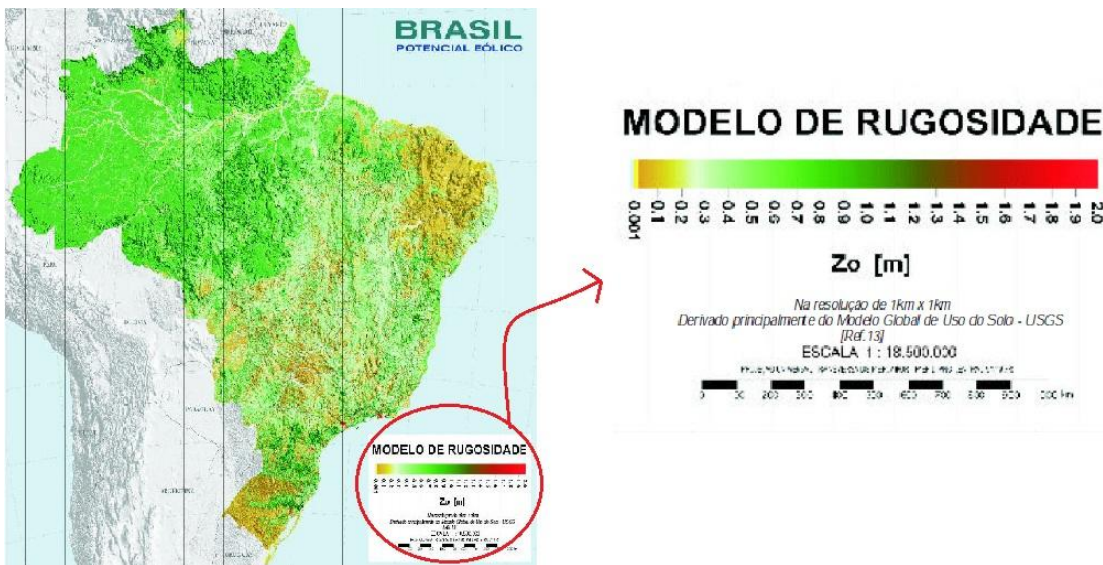


Figura 2: Rugosidade do terreno do Brasil  
 Fonte: Adaptado do Atlas do potencial eólico brasileiro (CRESESB)

Após serem calculadas as velocidades do vento nas demais altitudes utilizou-se a equação 2 para encontrar as suas respectivas densidades de potencial eólico.

A distribuição de Weibull é o método mais utilizado para realizar análise estatística do comportamento dos ventos além, de ser amplamente utilizado pela maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia (SILVA, 1999).

A função densidade de probabilidade de Weibull é dada por (DUTRA, 2007):

$$g(V) = (k/c) \cdot (V/c)^{k-1} \cdot \exp[-(V/c)^k] \quad [\text{Eq. 6}]$$

Onde:

k= fator de forma da distribuição dos ventos;

c= fator de escala ou a velocidade média dos ventos.

Para se calcular o fator de forma, utilizou-se a equação a seguir (DUTRA, 2007):

$$k = (\delta/V)^{-1,086} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Onde:

$\delta$  = desvio padrão;

V = velocidade média.

O fator de escala é calculado a partir da equação 7 (DUTRA, 2007):

$$c = V/\Gamma[1+(1/k)] \quad [\text{Eq. 7}]$$

Onde:

$\Gamma$  = função gama de argumento

$[1+(1/k)]$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As densidades de potencial e frequência de ventos com velocidades entre 2,5m/s e 28m/s dos municípios em estudo, obtidas, são apresentadas pelos gráficos das Figuras 3 e 4.

A Figura 3 mostra a variação da densidade de potencial eólico em diferentes alturas consideradas. Onde destaca-se o município de Ubajara apresentando valores de 121,88, 299,53, 372,76 e 411,35W/m<sup>2</sup>, referentes as alturas de 10, 50, 80 e 100m.

Das 3 Serras apresentadas, a serra da Ibiapaba apresentou maior média de potencial, 282,33W/m<sup>2</sup>, seguida da Serra da Meruoca, 162,47W/m<sup>2</sup>, e da Chapada do Araripe, 61,9W/m<sup>2</sup>.

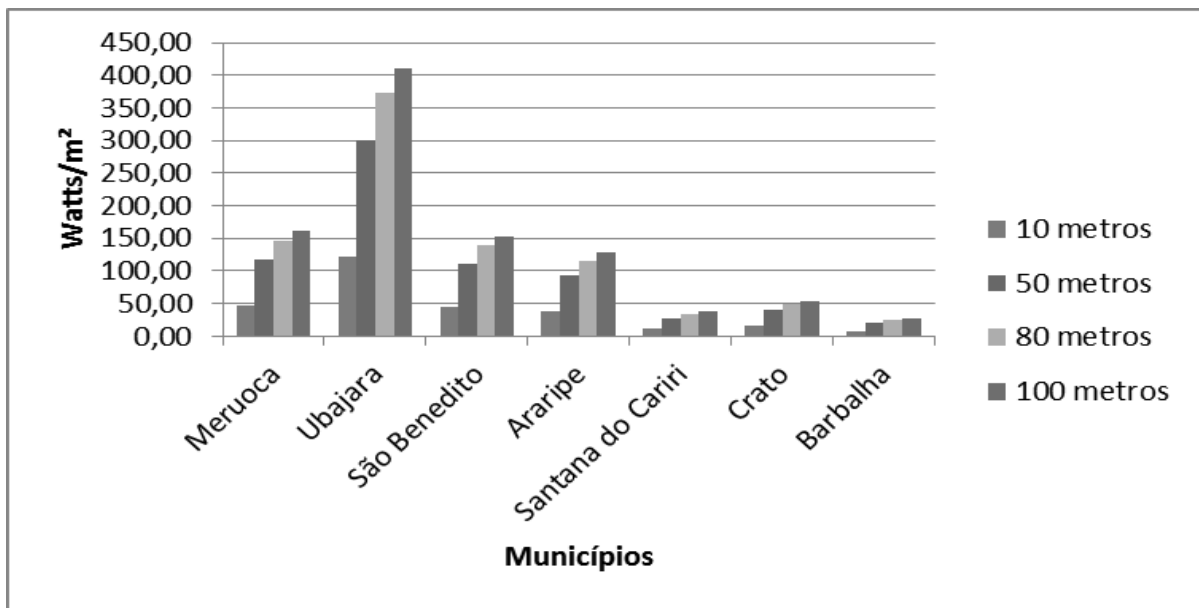


Figura 3: Densidade de Potencial em W/m<sup>2</sup> dos Municípios Serranos do Ceará  
 Fonte: Elaborado pelo Autor

O baixo potencial médio da Chapada do Araripe pode ser justificado, pela localização dos anemômetros nos 4 municípios em estudo e pelas baixas altitudes dos mesmo quando comparadas com as demais áreas em estudo, Tabela 1.

Tabela 1 – Altitude em metros dos municípios serranos.

Municípios	Altitude (m)
Meruoca	670
Ubajara	847,5
São Benedito	901,64
Araripe	605,8
Santana do Cariri	475
Crato	426,9
Barbalha	409

Fonte: IPECE (2011)

A Serra da Meruoca possui localidade mais próxima ao litoral do Estado, o que explica seu valor considerável de densidade.

Um fator muito importante para o estudo de energia eólica é a frequência em que a velocidade dos ventos é adequada para a geração da mesma, segundo Wobben (2012), a velocidade mínima de geração é 2,5m/s e a máxima 28m/s. Quanto mais frequentes valores de velocidade dentro desse intervalo maior é a produção de energia no local, Figura 4.

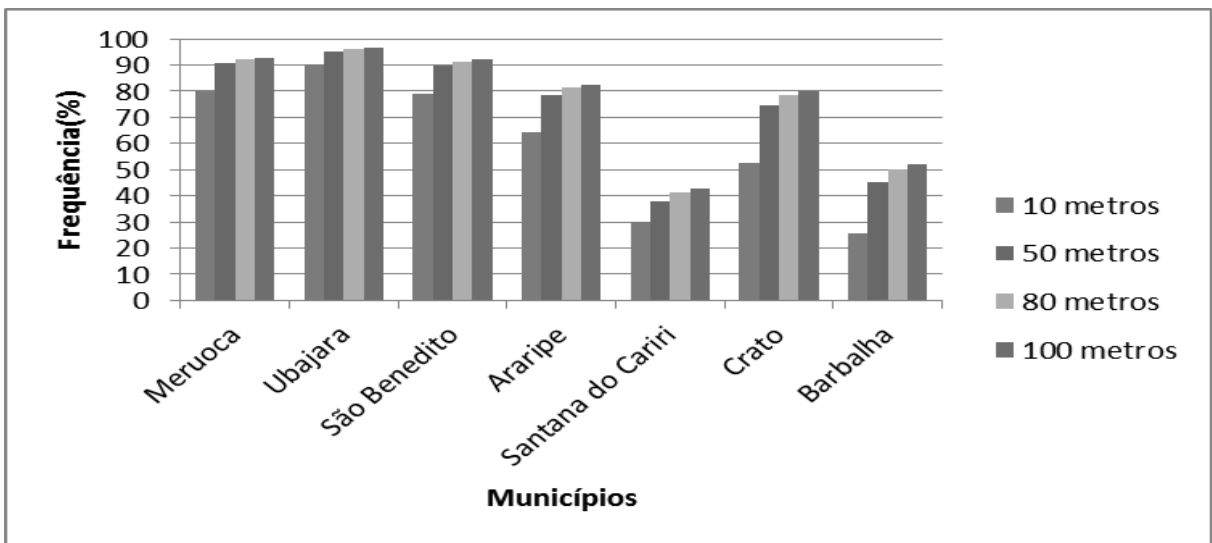


Figura 4: Probabilidade de geração de energia para velocidades entre 2,5m/s e 28m/s  
 Fonte: Elaborado pelo Autor

Pode se dizer que o município de Santana do Cariri não é adequado para a geração de energia eólica, pois o mesmo só apresenta as velocidades adequadas em menos de 50% das suas velocidades.

Observa-se na Figura 4 a discrepância entre as porcentagens de frequência a 10 metros e as demais alturas nos municípios de Araripe, Crato e Barbalha. Isso ocorre devido aos valores de velocidade a 10 metros serem próximos, mas inferiores ao valor mínimo estabelecido, onde quando há a estrapolação dos mesmos, estes passam a se enquadrar no intervalo ideal de geração.

## 6. CONCLUSÕES

Conclui-se que a região serrana do Ceará apresenta alta densidade de potencial eólico, tornando possível a implantação de parques eólicos na região, ajudando na descentralização de implantações na costa do estado. E das três serras estudadas, a Serra da Ibiapaba foi a que apresentou melhores resultados com altos valores de densidade de potencial e boa frequência em seus ventos, superior a 90%, quando comparadas com as demais.

Foi verificada significativa diferença nos valores de densidade de potencial eólico encontrados de Ubajara e São Benedito. Essa diferença pode ser justificada pelos aspectos climáticos, temperatura média e período chuvoso, divergente nos municípios, porém faz-se necessário investigação específica para comprovar tal hipótese.

Considera-se esse estudo como incentivo para a academia, governo e empresas para financiar mais pesquisas no setor de energia nessas áreas de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP) e ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) pelo suporte. E a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização de dados para a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

CRESESB. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001.



DUTRA, R.P. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro**. 2001. 272p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

G1 CE. **Ceará vai receber 48 novos parques eólicos nos próximos quatro anos**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ceara/noticia/2012/02/ceara-vai-receber-48-novos-parques-eolicos-nos-proximos-quatro-anos.html>>. Acesso em: 07 jul 2012.

IBGE. **Mapas**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/mapas\\_ibge/atlas.php](http://www.ibge.gov.br/mapas_ibge/atlas.php)> . Acesso em: 05 jul 2012.

IPECE. **Perfil Básico Municipal 2011**. Disponível em: <[www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/index\\_perfil\\_basico.htm](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/index_perfil_basico.htm)> Acesso em: 04 jul 2012

MACKINSEY&COMPANY. **Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil**. São Paulo. 45p. 2009.

PATEL, MUKUND R. **Wind and Solar Power Systems**. Copyrighted Material, 1999. 345 p.

QUASCHNING, VOLKER. **Understanding Renewable Energy Systems**. Earthscan – London, 2005. 272 p.

SILVA, P.C. **Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento**. 2009. Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ, 1999. Dissertação (Mestrado).

SUGETTE, A.B. **Ceará deve ter mais de 50 parques eólicos em 2014**. Disponível em: <http://diariodonordeste.globo.com/noticia.asp?codigo=326287&modulo=968>. Acesso em: 07 jul 2012.

WOBLEN. Disponível em: <[www.woblen.com.br](http://www.woblen.com.br)> . Acesso em: 25 jun 2012.