

## **DENSIDADE DE POTENCIAL EÓLICO NAS DIFERENTES REGIÕES DO ESTADO DO CEARÁ – LITORAL, SERRA, SERTÃO**

Inaiá Viana de Carvalho.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).  
inaiá\_vc@hotmail.com

Alice Luna Mesquita.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).  
alice.l.m@hotmail.com

Phylippe Gomes de Lima Santos.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).  
phylippesantos@gmail.com

José Sérgio dos Santos.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).  
sergio@ifce.edu.br

### **A CLIMATOLOGIA E AS NOVAS TECNOLOGIAS**

No século XX, os países foram incentivados a investir na geração de energia limpa. Esses investimentos foram justificados pelo compromisso registrado através da assinatura do Protocolo de Kyoto em minimizar a problemática ambiental existente. A enorme demanda por energia e centralização no setor energético também intensificaram a busca por tais fontes e tecnologias capazes de aproveitá-las com eficiência. O Brasil pelo PROINFA passou a investir em fontes alternativas, fortalecendo o setor energético nacional e minimizando impactos ambientais provenientes da queima fóssil. O Ceará por estar próximo ao oceano e ter bons ventos, tornou-se visado para implantação de parques eólicos. Essa vem acontecendo na área costeira, gerando concentração que ocasiona problemas socioambientais. O estudo objetiva quantificar a densidade de potência das três regiões (litoral, serra e sertão) do estado através de dados de velocidade de vento da FUNCEME, e através de método indutivo verificar a viabilidade energética da descentralização costeira de parques eólicos. São Benedito, Quixadá e Acaraú têm densidade de potência de 153,32W/m<sup>2</sup>, 74,89W/m<sup>2</sup> e 121,41W/m<sup>2</sup>, respectivamente, a 100m de altura e os três apresentam probabilidade de geração eólica superior a 50% em alturas distintas.

#### **Abstract**

In the twentieth century, countries were encouraged to invest in clean energy generation. These investments were justified by registered commitment by signing the Kyoto Protocol on minimizing the environmental problem exists. The huge demand for energy and centralization in the energy sector also intensified the search for such sources and technologies that can efficiently take advantage of them. The Brazil by PROINFA started to invest in alternative sources, strengthening national energy sector and minimizing environmental impacts from burning fossil. The Ceará being close to the ocean and have good winds, became targeted for deployment of wind farms. This has been happening in the coastal area, generating concentration which causes environmental problems. The study aims to quantify the power density of the three regions (coastal, mountain and backcountry) through the state data of wind speed FUNCEME, and through inductive method to verify the feasibility of decentralizing energy coastal wind farms. São Benedito, Quixadá and Acaraú has power density of 153.32 W / m<sup>2</sup>, 74.89 W / m<sup>2</sup> and 121.41 W / m<sup>2</sup>, respectively, at 100m tall and have three wind generation probability greater than 50% in different heights.

## Introdução

No fim do século XX, países industrializados foram estimulados a investir em energia proveniente de fontes renováveis, tais como, hidráulica, solar e eólica. Esses investimentos foram justificados pela responsabilidade desses países de solucionar ou minimizar a problemática ambiental existente, onde firmou-se um compromisso de mudanças através da assinatura do Protocolo de Kyoto em 1997, que objetiva a redução das emissões de carbono através de três mecanismos, a Implementação Conjunta (*Joint Implementation*); o Comércio de Emissões (*Emission Trading*); o terceiro, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo-MDL (*Clean Development Mechanism*) (GREENPEACE).

Já no século XXI, a enorme demanda por energia e a centralização no setor energético, passou a receber uma atenção especial mundialmente. Tornando ainda mais motivo de estudo a situação energética global e a busca por fontes renováveis de energia e tecnologias capazes de aproveitá-las com maior eficiência principalmente para gerar eletricidade.

O Brasil, país em desenvolvimento, mostrou-se como exemplo para os países já desenvolvidos, por ter uma matriz energética baseada em energia hidráulica, sendo essa uma fonte renovável de energia.

Porém, mesmo com uma base energética renovável, o país, vendo o crescimento gradativo da utilização de outras fontes energéticas e percebendo que possui condições climáticas favoráveis para expandir e descentralizar sua matriz energética resolveu seguir o mesmo caminho dos países desenvolvidos e investir em fontes alternativas geradoras de energia limpa, modificando e fortalecendo o setor energético nacional e minimizando ainda os impactos ao meio ambiente provenientes da geração de energia.

Devido ao fato de já possuir uma tecnologia desenvolvida internacionalmente, e estudos mostrarem que o Brasil possui ventos propícios para a geração de energia elétrica, o governo passou a dar um maior destaque, a princípio, a geração de energia por meio dos ventos, favorecendo-a através do Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) de 2002.

O Nordeste, devido a sua localização geográfica e condições meteorológicas, foi apontado, em estudos e pesquisas, como região mais propícia para a geração de energia eólica e solar, tendo possivelmente ainda um potencial considerável de energia proveniente das ondas e marés.

Dentre os nove estados nordestinos, o Rio Grande do Norte e Ceará se destacaram pouco a pouco, devido principalmente ao fato de estarem próximos ao oceano e receberem ventos de diferentes regiões e direções. Assim, passaram a ser os estados mais visados para a implantação de parques eólicos.

Porém, a implantação de parques no Ceará vem acontecendo apenas na área costeira do estado, gerando assim uma concentração que ocasiona o desconforto por parte da população e maximiza impactos como o visual.

Os parques no Estado, além de Aquiraz, eles estão instalados em Acaraú, 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.

### Objetivo

Quantificar e analisar a capacidade do Estado do Ceará de gerar energia elétrica por meio dos ventos em suas três distintas regiões (litoral, serra, sertão) e verificar condições que evitem ou minimizem a concentração dos parques eólicos no litoral cearense.

### Fundamentação teórica

Devido aos problemas ambientais e a prevenção de possíveis crises energéticas, as energias denominadas limpas vêm ganhando cada vez mais espaço no setor energético. De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010), as principais forças motrizes que impulsionam a utilização de energias renováveis são: as preocupações com o aquecimento global, a busca por segurança energética e a volatilidade dos preços do petróleo.

Essa acelerada expansão pode ser percebida através da tabela abaixo, onde mostra que países como China e Índia vem se destacando através da quantidade de capacidade instalada em seus territórios.

Tabela 1: Capacidade de energia eólica instalada em 2009

	Capacidade instalada até 2009(MW)
Estados Unidos	35.064,00
Alemanha	25.777,00
Espanha	19.148,80
China	25.805,30
Índia	10.926,00
Brasil	605,70

Fonte: GWEC

Segundo Ministério do Meio Ambiente do Brasil, estimasse que o potencial eólico bruto mundial, seja de ordem de 500.000 TWh/ano (terawatt-hora por ano), o que significa mais de 30 vezes o atual consumo mundial de eletricidade. Desse potencial, no mínimo 10% é teoricamente aproveitável, o que corresponde a cerca de 4 vezes o consumo mundial de eletricidade.

O Brasil, apesar de possuir como principal fonte energética, as hidrelétricas, também consideradas, fonte limpa vem investindo bastante nas demais renováveis e de acordo com Leal (2010), os investimentos em energias renováveis, em particular a eólica, vêm crescendo bastante, devido, principalmente, ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. A indústria de energias renováveis no País deverá crescer mais do que a média mundial, estimada entre 15 e 20%.

O PROINFA possibilitou a princípio o aumento e estímulo de investimentos públicos e particulares em três fontes renováveis específicas, sendo elas as pequenas centrais hidrelétrica (PCH), por biomassa e a eólica.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2011), o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por montante superior a 74,% da oferta e somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que aproximadamente 86% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis.

A Figura 1, mostra as fontes de energia que compõem a matriz energética brasileira no ano de 2010.

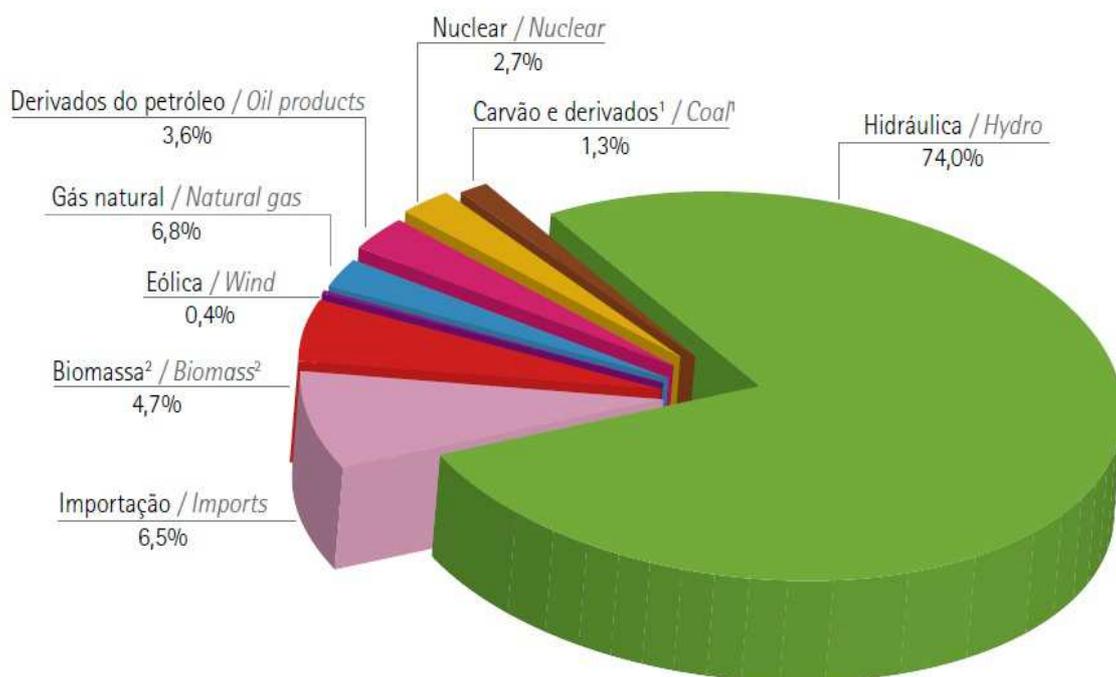


Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte – 2010

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2011)

A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 2.176,6 GWh em 2010. Isto representa um aumento em relação ao ano anterior (75%), quando se alcançou 1238,0 GWh. (EPE, 2011).

## Metodologia

### Área de Estudo

Os municípios utilizados para esse estudo representam as diferentes regiões, Litoral, Serra, Sertão, do Estado do Ceará, sendo eles (IPECE, 2011):

- Acaraú, localizado na microregião de Litoral do Camocim e Acaraú, com Temperaturas médias de 26° a 28° e Período Chuvoso entre janeiro e abril;
- Quixadá, localizado na microregião de Sertão de Quixeramobim, com Temperaturas médias de 26° a 28° e Período Chuvoso entre fevereiro e abril;
- São Benedito, localizado na microregião do Cariri/Chapada do Araripe, com Temperaturas médias de 22 a 24 °C e Período Chuvoso entre janeiro e maio.

A Figura 2 mostra a localização dos municípios estudados no Estado do Ceará.

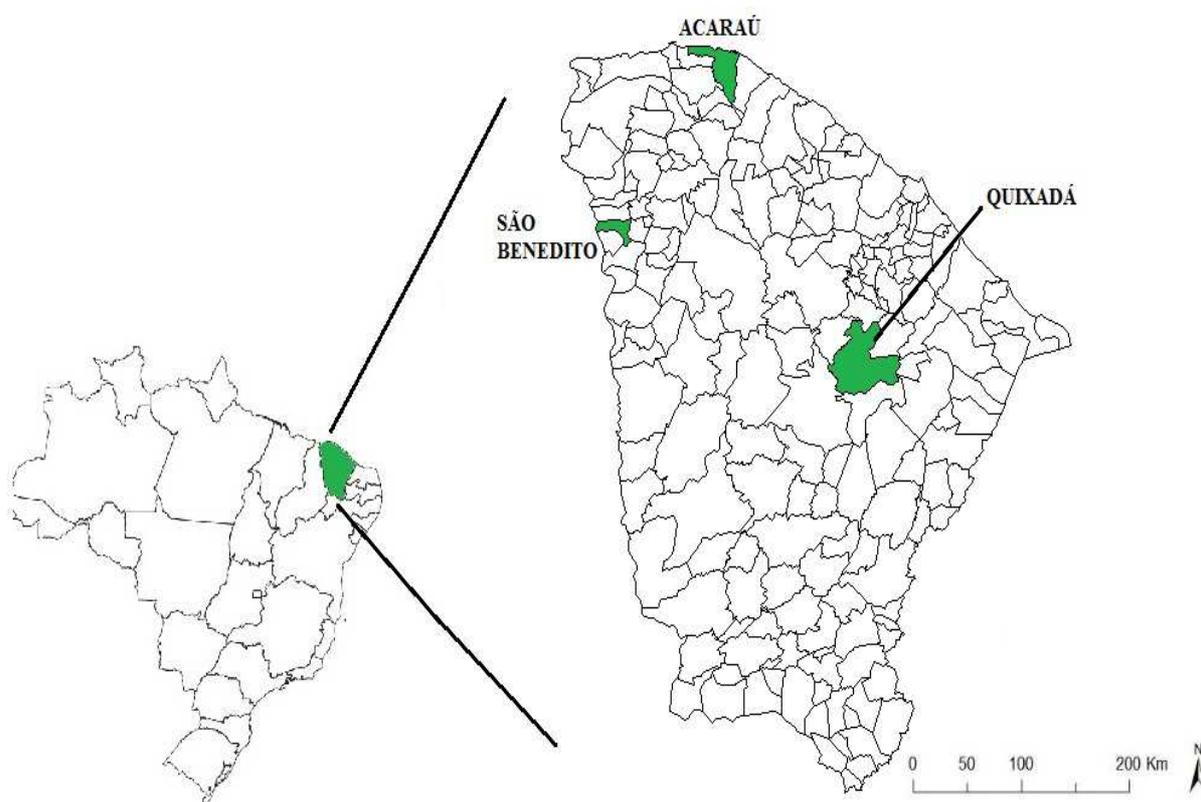


Figura 2: Localização de Acaraú, São Benedito e Quixadá.

Fonte: Adaptado da Base Cartográfica IBGE (2012)

Para a seleção dos municípios representantes de cada área, foi considerado os maiores valores encontrados de densidades de potência, considerando também dados de mesmo período. Ou seja, dos municípios litorâneos com dados de 2010 a 2011, Acaraú é o que apresenta maior valor de densidade de potência, o mesmo ocorreu com Quixadá no Sertão e São Benedito na região serrana do Estado.

### 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), referentes aos três 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 potência, 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 3, e observou-se que todos os municípios estudados possuem rugosidade ( $Z_0$ ) igual a 0,1.

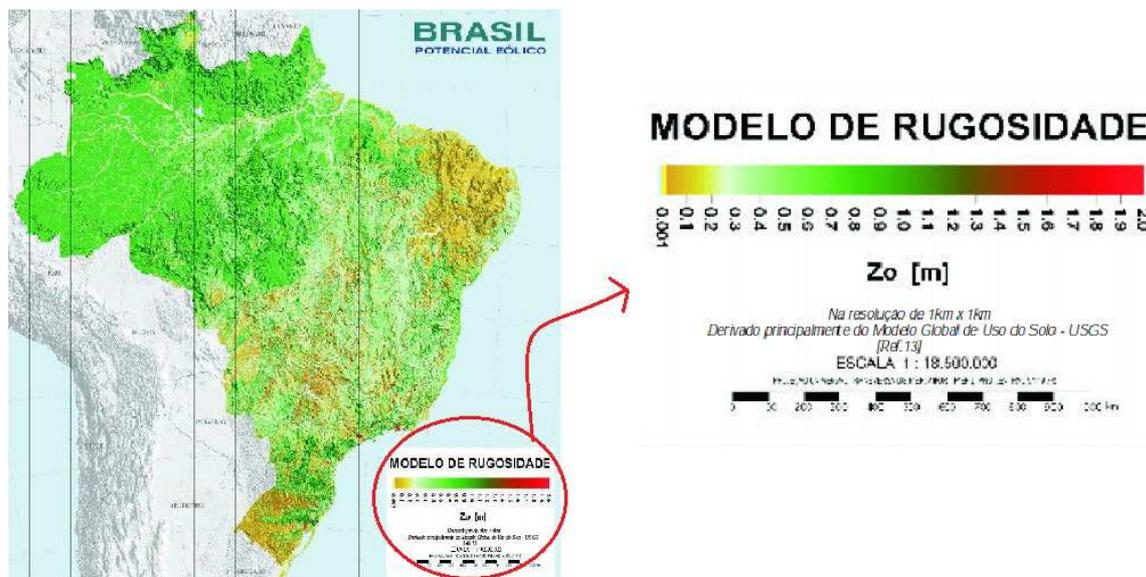


Figura 3: Rugosidade do terreno do Brasil

Fonte: Adaptado do Atlas do potencial eólico brasileiro (AMARANTE, 2001)

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

$[1+(1/k)]$

## Resultados e Discussão

As velocidades médias de vento e as máximas registradas pelas medições no período de 2010 e 2011 são apresentadas na Tabela 2.

Pode-se perceber que a 10 metros de altura a menor média foi de Quixadá, 2,74m/s. Mesmo sendo um valor considerado baixo, ainda é superior a velocidade mínima de geração de uma aerogerador, segundo Wobben (2012), a velocidade mínima de geração é 2,5m/s e a máxima 28m/s.

Tabela 2: Velocidades médias e máximas em diferentes alturas

	Altura (m)	Municípios		
		Acaraú	Quixadá	São Benedito
<b>Velocidade Média (m/s)</b>	10m	3,2	2,74	3,8
	50m	4,3	3,7	5,1
	80m	4,6	3,98	5,49
	100m	4,8	4,11	5,67
<b>Velocidade Máxima (m/s)</b>	10m	7	7,17	11,59
	50m	9,45	9,68	15,64
	80m	10,16	10,41	16,82
	100m	10,5	10,76	17,39

Fonte: Dados da pesquisa

Verifica-se também, ainda na Tabela 2, que a velocidade máxima medida foi de 17,39m/s em São Benedito, município serrano.

As densidades de potência encontradas para os três municípios em estudo estão representadas na Figura 4.

A Figura 4 mostra a variação da densidade de potência eólica em diferentes alturas consideradas. Onde destaca-se o município de São Benedito apresentando valores de 45,43, 111,64, 138,93 e 153,32W/m<sup>2</sup>, referentes as alturas de 10, 50, 80 e 100m. Tal destaque pode ser justificado devido ao fato de o município serrano está localizado em altitude alta quando comparado com os demais.

Dos 3 municípios apresentados, a serra de São Benedito apresentou maior média de potencial, 112,33W/m<sup>2</sup>, seguida do município costeiro Acaraú, 88,95W/m<sup>2</sup>, e do município do sertão Quixadá, 54,86W/m<sup>2</sup>.

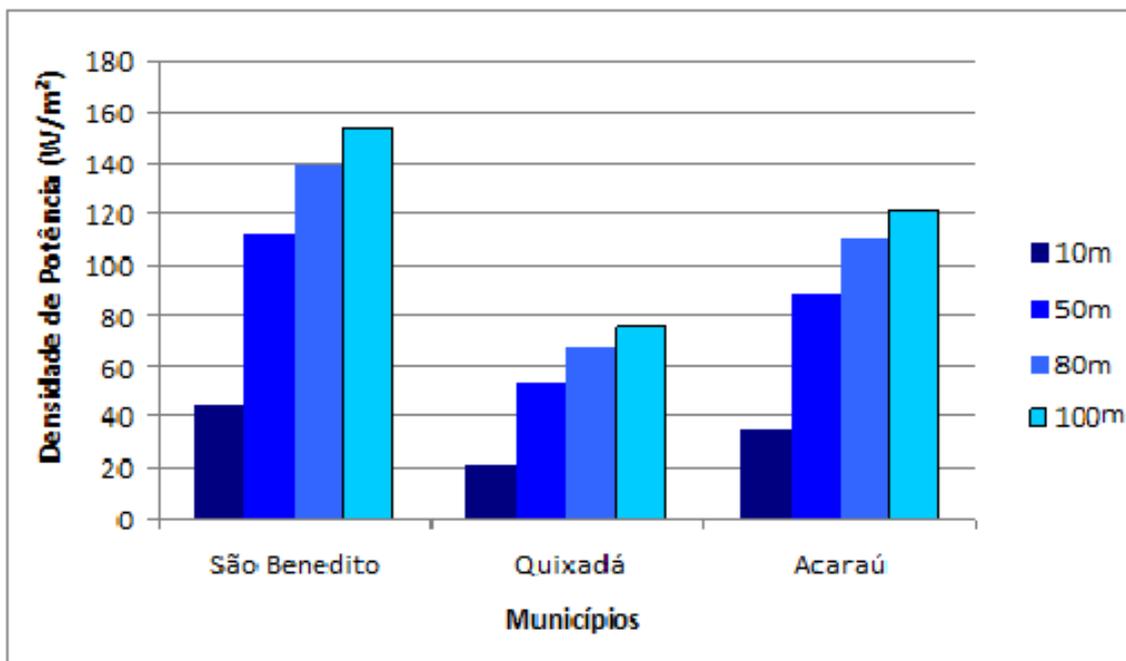


Figura 4: Densidade de Potência em alturas distintas

Fonte: Dados da pesquisa

Quanto mais frequentes valores de velocidade do vento dentro do intervalo de 2,5m/s e 28m/s maior é a produção de energia no local, Figura 5.

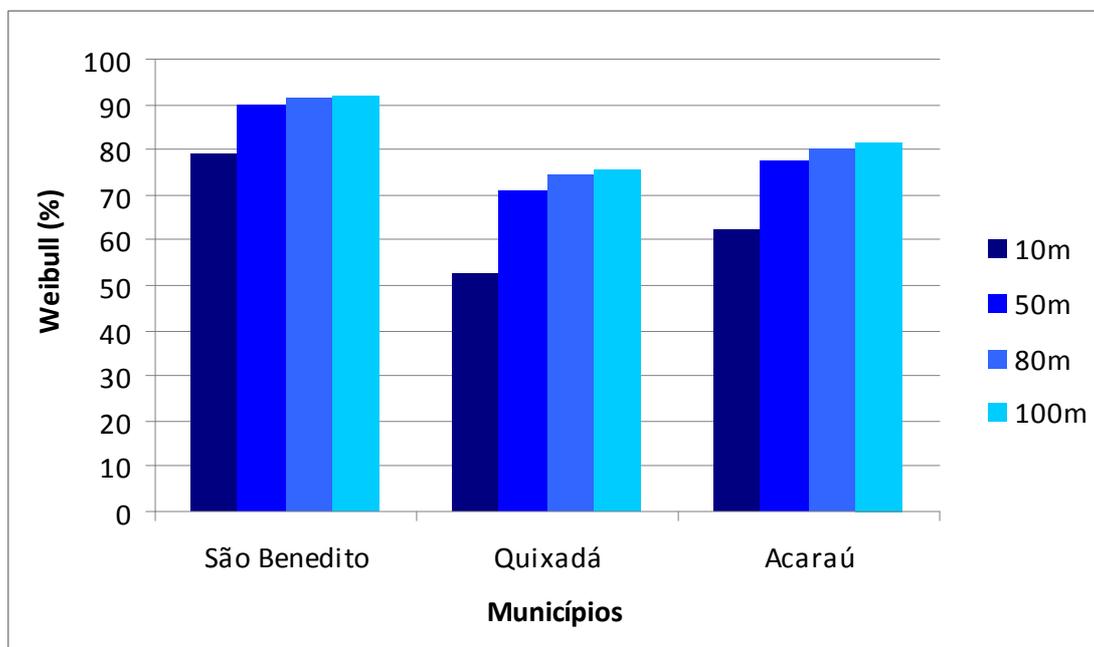


Figura 5: Probabilidade de geração de energia eólica para velocidades entre 2,5m/s e 28m/s

Fonte: Dados da pesquisa

Pode se dizer que os três municípios possuem condições consideráveis de geração de energia, visto que mais de 50% das suas velocidades apresentam valor adequado.

Observa-se na Figura 5 que o município de Quixadá possui probabilidade de geração semelhante à Acaraú, porém Acaraú apresenta densidade de potência 62% superior a Quixadá, e que São Benedito possui probabilidade de gerar energia eólica superior a 90% nas alturas de 80m e 100m.

### **Conclusão**

Conclui-se que o Estado do Ceará tanto no Litoral, como na Serra e no Sertão, possui valores de velocidade de vento bons para a geração de energia elétrica por meio dos ventos. E que a região serrana, representada por São Benedito, apresenta alta densidade de potência eólica, tornando possível energeticamente à implantação de parques eólicos na região, ajudando na descentralização de implantações na costa do estado.

Porém, o mesmo não se dá para o Sertão que mesmo tendo uma boa frequência em seus ventos, possui densidade de potência inferior ao município de Acaraú, o que torna inviável energeticamente a implantação de parques eólicos na região quando comparado com o Litoral.

Faz-se necessário estudos e pesquisas complexas que considerem não apenas a questão energética, mas também social e econômica antes da escolha de sítios eólicos na região Serrana e Sertaneja do estado.

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

### **Referências Bibliográficas**

- AMARANTE, O.A.C; BROWER, M; ZACK, J; Sá, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro** Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Química Verde no Brasil: 2010-2030**. Brasília, DF, 2010.
- DUTRA, R.P. **Viabilidade tecnico-economica 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.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanço Energético Nacional 2011: Ano base 2010**/ Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2011.
- FUNCEME. **Dados da rede pirata**. Disponível em: [www.funceme.br/index.php/dados-da-rede-pirata](http://www.funceme.br/index.php/dados-da-rede-pirata)  
Acesso em: 11 de outubro de 2011.

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.**

Global Wind Energy Council (GWEC). Regions. Disponível em: <http://www.gwec.net/index.php?id=9>  
Acesso em: 11 de out. de 2010

GREENPEACE. **O Protocolo de Kyoto**. Disponível em <[www.greenpeace.org.br/clima/pdf/protocolo\\_kyoto.pdf](http://www.greenpeace.org.br/clima/pdf/protocolo_kyoto.pdf)> *Acesso em: 29 ago 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: 28 ago 2012

LEAL, JOCÉLIO. Disponível em:  
<<http://opovo.uol.com.br/opovo/colunas/verticalsa/969897.html>>. Acesso em: 22 abr. 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia – PROINFA**. Disponível em <[http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias\\_contempladas.html](http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias_contempladas.html)> Acesso em: 29 ago. 2012.

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).