

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO VALE DO RIO JAGUARIBE UTILIZANDO MODELAGEM ATMOSFÉRICA

Camylla Maria Narciso de Melo – camyllammelo@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

João Bosco Verçosa Leal Júnior – jblealjr@gmail.com

Universidade Estadual do Ceará, Departamento de Física

Francisco das Chagas Vasconcelos Júnior – juniophy@gmail.com

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Departamento de Meteorologia e Oceanografia

Danielle Kely Saraiva de Lima - danielle.kely@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Francisca Dayane Carneiro de Melo - dayane.fcm@gmail.com

Universidade Estadual do Ceará, Mestrado de Ciências Físicas Aplicadas

Resumo. No interior do estado do Ceará, ocorre um fenômeno bem conhecido pelos moradores, principalmente daqueles que habitam próximo a bacia do rio Jaguaribe, chamado de vento Aracati. Na literatura, o mesmo tem duas caracterizações para seus mecanismos, uma procurou descrevê-lo com características semelhantes a uma brisa marítima, e em outra abordagem caracteriza-o como sendo consequência de um Jato de Baixos Níveis (JBN). Neste trabalho, tem-se o objetivo de analisar o potencial eólico, a 50 e 80 m de altura, de algumas cidades que se encontram no vale do rio Jaguaribe. Para tal, utiliza-se da modelagem atmosférica regional para aquisição desses dados de velocidade, uma vez que não existe registro de dados coletados nas alturas desejadas nessa região. Utiliza-se ainda a configuração do modelo encontrada na literatura, validada e que melhor representa variáveis atmosféricas sobre a região do vale do rio Jaguaribe, para se realizar as simulações referentes ano de 2006, nas cidades de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova. A partir dos resultados do modelo, estudou-se o potencial eólico nessas cidades. O software Windographer foi utilizado para se obter os dados referentes à produção de energia com a utilização do aerogerador modelo E-70 da Enercon. Os dados de consumo de energia elétrica nas cidades avaliadas foram retirados do Anuário Estatístico do Ceará 2008, sendo comparados àqueles obtidos das simulações. A utilização do vento nessas cidades para geração de energia elétrica é melhor aproveitado os ventos a 80 m de altura, pois apresentam as maiores velocidades e necessita-se de uma quantidade inferior de aerogeradores para produzir a demanda necessária para suprir as cidades, se comparados aos necessário para 50 m de altura.

Palavras-chave: Energia Eólica, Modelagem Atmosférica, Vento Aracati.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve um grande aumento no consumo de energia elétrica no Brasil, tornando a utilização de outras fontes de energia algo extremamente necessário. Atualmente o Brasil dispõe de 838 hidrelétricas com uma capacidade total de 78.793.231 kW (ANEEL, 2008).

A geração de energia elétrica no Brasil cresceu a uma taxa média anual de 4,2% entre 1980 e 2002 (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Sempre a energia hidráulica foi dominante, uma vez que o Brasil é um dos países mais ricos do mundo em recursos hídricos.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) vem registrando situações de recorde no consumo elétrico brasileiro, o último registrado no dia 03/01/2010, ocasionando uma maior pressão no sistema elétrico e havendo a necessidade do ligamento de mais térmicas para aliviar o nível dos reservatórios. Esse tipo de situação nos leva a compreender como a utilização de outras fontes de energia se torna extremamente necessária, visto que apenas as hidrelétricas não estão mais suportando a demanda do país.

No interior do estado do Ceará, na região do vale do rio Jaguaribe, ocorre um vento local denominado de vento Aracati. Camelo (2007), utilizando dados de Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), encontrou algumas ocorrências deste vento em cidades próximas a bacia do rio Jaguaribe.

Este vento ocorre nos fins das tardes e início de noites quentes, principalmente na época seca do ano, se originando no mar e adentrando o sertão através do vale do rio Jaguaribe. Na Fig. 1 está representado o mapa do Ceará, com destaque em vermelho para a região de ocorrência do vento Aracati, segundo relatos dos moradores dessa região. A

partir do mapa, é possível identificar a proximidade das cidades onde os moradores relatam o evento com o rio Jaguaribe.



Figura 1 - Mapa do estado do Ceará e em destaque em vermelho o rio Jaguaribe. Fonte: Camelo (2007)

O objetivo deste trabalho é o de avaliar o potencial eólico do vale do rio Jaguaribe, a alturas de 50 e 80 m, nas cidades de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova. Para se fazer essa avaliação, é necessário obter os dados de velocidade do vento a essas determinadas alturas. A principal fonte de dados referentes a velocidade no estado do Ceará é a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), sendo que esta coleta dados nas PCDs a apenas 10 m de altura.

Para a obtenção da velocidade e direção do vento a 50 e 80 m de altura, são realizadas simulações numéricas com o modelo atmosférico regional RAMS, na sua versão 6.0. As configurações utilizadas nessas simulações foram propostas por Vasconcelos Júnior (2010), que buscou obter a configuração que melhor descrevia as variáveis atmosféricas sobre a região do vale do rio Jaguaribe, para os períodos, chuvoso e sem precipitação. Ele abordou as seguintes cidades: Acopiara, Icó, Icapuí, Jaguaruana, Lavras da Mangabeira e Morada Nova.

A partir dos resultados do modelo, procura-se analisar o potencial eólico dessas cidades utilizando o software Windographer®, que fornece o comportamento da velocidade do vento no perfil horário e mensal, e a energia produzida por um aerogerador.

O programa Windographer® foi desenvolvido pela *Mistaya Engenharia INC.* No seu endereço eletrônico (<http://www.mistaya.ca/windographer/>) encontra-se uma versão disponível para “download”, com licença para uso de 14 dias, além de obter informações sobre o funcionamento do mesmo. Utilizou-se também planilhas eletrônicas do programa Excel® para tratamento dos dados a serem usados no Windographer®.

2. VENTO ARACATI

No interior do estado do Ceará, próximo à bacia do rio Jaguaribe, existe um fenômeno meteorológico denominado de vento Aracati, sendo chamado assim principalmente pelos habitantes das localidades que relatam a ocorrência do mesmo.

A palavra Aracati possui variados significados e já foi utilizada por diversos autores da literatura brasileira. A expressão encontrada que mais se adequa as características do vento Aracati é a utilizada por Raimundo Girão, que identifica o Aracati como sendo “monção ou brisa que sopra nas tardes de verão, saindo do mar e entrando no sertão, refrescando-os”. Nos dicionários da língua portuguesa, encontra-se o significado da palavra Aracati como sendo: “vento que sopra de nordeste para sudoeste, em certas regiões do Nordeste”. Pesquisando o seu significado na língua Tupi, foi encontrado diversas versões, como por exemplo “vento ou rajada forte”, “aragem forte” e “vento que cheira” (CAMELO, 2007).

Camelo (2007) propõe que este fenômeno, o Aracati, ocorre nos fins das tardes e início de noites quentes, principalmente na época seca do ano, se originando no mar e adentrando o sertão através do vale do rio Jaguaribe. Este rio possui 610 km de extensão, sua nascente se localiza na Serra da Joaninha (Tauá, CE) e a sua foz na cidade de Aracati (GATTO, 1999). Em seu trabalho, ele especificou as cidades onde ocorria o vento Aracati, bem como a frequência de ocorrência deste nas cidades do vale do rio Jaguaribe.

Camelo et al. (2008) verificaram o comportamento dos ventos no estado do Ceará. Observou-se que o Aracati possui um comportamento distinto do normal, pois uma das características do vento no estado é o fato de ser mais intenso durante o período da tarde, e o Aracati registra em sua passagem o valor máximo de intensidade no final da tarde e início da noite.

2.1 Mecanismos de geração do vento Aracati

Há duas importantes abordagens na literatura sobre os mecanismos do vento Aracati, considerando sua origem e forma de comportamento. O primeiro estudo foi realizado por Camelo (2007), que buscou identificar as possíveis origens do vento Aracati, e propõe a caracterização do mesmo como sendo semelhante a uma brisa marítima. Este tipo de circulação ocorre devido à diferença entre fluxos de calor sensível e latente entre duas superfícies distintas (terra-mar) (ALCÂNTARA; SOUZA, 2008). Posteriormente, os estudos de Vasconcelos Júnior (2010) revelaram que o Aracati pode ser identificado como estando associado a um Jato de Baixo Nível (JBN) (DAVIES, 2000).

A brisa marítima ocorre durante o dia, sob influência do contraste das temperaturas do ar sobre o oceano e continente. Pela manhã o continente está mais aquecido do que o oceano, pelo fato do calor específico da água ser maior do que o da terra, fazendo com que esta varie sua temperatura relativamente mais lentamente do que a da terra. Isso faz com que a massa de ar que esteja logo acima do continente diminua sua densidade, tendendo a subir, e a que estiver logo acima do oceano, seguirá na direção do continente.

No período noturno, o fenômeno se inverte, sendo conhecido como brisa terrestre, onde as temperaturas do ar acima do oceano estão mais altas do que a do continente, dessa maneira, a massa de ar sobre o continente segue em direção ao oceano.

Como citado anteriormente, Camelo (2007), no estudo para verificar as possíveis origens do Aracati, fez uma análise estatística da velocidade do vento através de dados coletados nas Plataformas de Coletas de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). As PCDs estão distribuídas por todo o estado do Ceará e realizam medições de velocidade do vento a 10 m de altura, dentre outras variáveis.

A fim de observar as regiões que possuem ocorrência do vento Aracati, ou seja, onde a máxima de velocidade do vento ocorre entre os horários de 18 h a 00 h, horário local, em relação ao restante do dia, Camelo (2007) avaliou a velocidade do vento em diversas localidades no estado, tendo ainda realizado uma análise estatística da velocidade do vento para os 12 meses do ano de 2005.

Os estudos realizados foram referentes ao dia 14 de novembro de 2005, nas cidades de Icó e Solonópole, cidades estas que apresentaram o fenômeno do vento Aracati.

Na cidade de Icó, às 21:00 h, a velocidade média horária chegou a quase 6 m/s, ou seja, bem maior do que o máximo valor durante o dia, que foi um pouco menos de 4 m/s às 10 h. Observou-se o fenômeno também na cidade de Solonópole, com médias horárias de velocidade de 9,0 m/s às 19 h, maior do que a máxima durante o dia, que foi de aproximadamente 8 m/s às 11 h.

Após a análise estatística da velocidade do vento, Camelo (2007) verificou a ocorrência do vento Aracati nas seguintes cidades: Acopiara, Banabuiú, Castanhão, Icapuí, Icó, Iguatu, Itaiçaba, Jaguaretama, Jaguaribe, Jaguaruana, Morada Nova, Senador Pompeu e Solonópole.

Nas cidades de Boa Viagem, Crateús, Ipú, e Sobral foi caracterizado um fenômeno semelhante ao Aracati, apesar das mesmas não se encontrarem nas proximidades do rio Jaguaribe. As PCDs que merecem destaque quanto ao percentual de dias no ano que se caracterizou o vento Aracati são as instaladas nas cidades de: Banabuiú, Castanhão, Jaguaretama, Jaguaribe, Senador Pompeu e Solonópole.

Outro estudo bastante significativo proposto por Vasconcelos Junior (2010), discute o vento Aracati como sendo consequência de um Jato de Baixos Níveis (JBN). Na literatura, encontram-se diversas definições para os mesmos. Vasconcelos Júnior (2010) adotou a proposição utilizada por Davies (2000), que conceitua jato como sendo uma máxima velocidade do vento em uma região delimitada, formando um fluxo, podendo existir em várias altitudes, comprimentos e espessuras na atmosfera. Quando esses jatos são observados na baixa troposfera, dentro dos primeiros 1500 m de altura em relação à superfície, são chamados de JBN.

3. METODOLOGIA

3.1 Simulações Numéricas

Para se obter os dados referentes à característica de velocidade do vento, foram realizadas simulações numéricas utilizando o Modelo Atmosférico Regional RAMS, na sua versão 6.0, que foi desenvolvido na Universidade Estadual do Colorado. Esse modelo é bem aceito pela comunidade científica e bastante utilizado para previsões numéricas de tempo, sendo capaz de reproduzir boa parte dos fenômenos atmosféricos (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003).

A configuração da simulação utilizada neste trabalho foi proposta por Vasconcelos Júnior (2010), onde, em seu trabalho, ele se propôs a verificar a configuração que melhor descreveria as variáveis atmosféricas sobre a região do vale do rio Jaguaribe. A bacia deste rio está compreendida entre as coordenadas 37,5° e 41° de longitude oeste e 4,5° e 7,75° de latitude sul.

Dentro das cidades avaliadas por Vasconcelos Júnior (2010), a saber, Acopiara, Icapuí, Icó, Jaguaruana, Lavras da Mangabeira e Morada Nova, selecionou-se três delas que mais consumiram energia elétrica no ano de 2006, a fim de verificar o potencial eólico dessas cidades. O ano de 2006 foi escolhido pela consistência dos dados meteorológicos e do Anuário Estatístico do Ceará.

Segundo dados propostos no Anuário Estatístico do Ceará de 2008 (IPECE, 2008), que contém informações

referentes ao ano de 2006, conclui-se que as cidades que mais consumiram energia elétrica, dentre as seis, foram: Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova.

Para simular o regime dos ventos, com o intuito de encontrar dados para geração de energia elétrica, é sugerido que sejam utilizadas grades com a menor resolução possível (CUNHA, 2008).

O modelo utiliza grades 3D, (geralmente 3 ou 4) em que o domínio das mesmas pode ser ajustado para estudar uma determinada área. A resolução vertical pode ser variável dentro de cada grade. O RAMS ainda possui a opção de "aninhar" as grades, podendo assim obter uma resolução crescente na direção da região de maior interesse. A técnica do "aninhamento" permite que as grades sejam inseridas uma dentro da outra, permitindo assim que as mesmas troquem informações nos dois sentidos, da maior para menor e vice-versa.

Nas simulações realizadas neste trabalho, utilizaram-se três grades "aninhadas" e centradas no mesmo ponto, no centro da bacia do vale do rio Jaguaribe.

Na Tab. 1 são apresentados os parâmetros das configurações das grades, resolução horizontal, pontos de grade, resolução vertical inicial, níveis verticais, razão de alargamento na vertical e espaçamento máximo na vertical. A grade 1, com resolução horizontal de 40 km, compreende quase todo o nordeste e uma faixa litorânea do Oceano Atlântico. Com uma resolução de 10 km, a grade 2 abrange toda parte oeste do estado, juntamente com o leste do Rio Grande do Norte e da Paraíba. A grade 3, que possui uma resolução de 2,5 km, comporta toda a bacia do rio Jaguaribe.

Tabela 1 – Grades do modelo. Fonte: Vasconcelos Júnior (2010).

Parâmetro	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Espaçamento em x	40 km	10 km	2,5 km
Espaçamento em y	40 km	10 km	2,5 km
Pontos de grade x	48	50	98
Pontos de grade y	64	66	134
Espaçamento inicial em z	20 m	20 m	20 m
Níveis verticais	55	55	55
Razão de alargamento em z	1,1	1,1	1,1
Espaçamento em z máximo	1000m	1000m	1000m

3.2 Configuração das simulações

Vasconcelos Júnior (2010), em seu trabalho, realizou testes de sensibilidade a fim de obter a melhor configuração dos parâmetros atmosféricos do modelo RAMS para a região do vale do rio Jaguaribe, nos períodos sem precipitação e com chuva.

As configurações dos testes partiram de uma simulação controle, a partir do qual se configurou mais cinco opções de testes. Para os testes, permutou-se mudanças de parametrizações, atualizações e opções de nudging, ou relaxamento Newtoniano, totalizando assim seis tipos de simulações.

Na Tab. 2 está disposta a simulação controle, a partir dela foram realizadas as permutações para construir os cinco demais testes.

Tabela 2 – Ajustes da simulação controle. Fonte: Vasconcelos Júnior (2010).

Simulação c ontrole	
Nudging Central	21600 s
Parametrização de Convecção	Kuo Parametrização de
Turbulência	Mellor-Yamada
Atualização de Radiação	600 s Atualização de
Convecção	1200 s

As configurações das simulações realizadas neste trabalho, seguiram as conclusões obtidas por Vasconcelos Júnior (2010), onde em seu trabalho ele conclui qual dos tipos de configurações testadas a que melhor se adéqua aos períodos chuvoso e seco, para a região do vale do rio Jaguaribe. As simulações realizadas por ele abrangem dois períodos distintos do ano: março e abril, sendo compreendidos pela quadra chuvosa, e outubro e novembro, sendo considerados o período sem precipitação.

Após realizar seis tipos de configurações diferentes para ver a que melhor se adequava aos períodos em estudo, Vasconcelos Júnior (2010) selecionou uma configuração referente para cada período. As Tabs. 3 e 4 revelam as configurações respectivas para cada período do ano, chuvoso e seco. De acordo com ele, essas foram as melhores configurações estudadas para os períodos do ano, chuvoso e sem precipitação.

Tabela 3 – Ajustes da simulações do período chuvoso. Fonte: Vasconcelos Júnior (2010).

Nudging Central	21600 s
Parametrização de Convecção	Kain-Fritsch
Parametrização de Turbulência	Mellor-Yamada
Atualização de Radiação	600 s
Atualização de Convecção	1200

Tabela 4 – Ajustes da simulações do período seco. Fonte: Vasconcelos Júnior (2010).

Nudging Central	21600 s
Parametrização de Convecção	Kuo
Parametrização de Turbulência	Mellor-Yamada
Atualização de Radiação	1200 s
Atualização de Convecção	1200 s

As simulações realizadas neste trabalho utilizaram dados referentes ao ano de 2006, sendo divididas em dois períodos: de janeiro a junho, e julho a dezembro. O primeiro semestre do ano foi considerado como o período chuvoso para a região, assim utilizou-se a configuração específica da Tab. 3, escolhida por Vasconcelos Júnior (2010). Os restantes dos meses do ano foram classificados como período seco, sendo assim utilizada a configuração da Tab. 4.

4. POTENCIAL EÓLICO

4.1 Uso de modelagem para avaliação de potencial eólico

A estimativa dos ventos médios levando em conta dados climatológicos, e a previsão de vento para instantes futuros em curto e médio prazo, fazem parte das principais aplicações da modelagem atmosférica para avaliação de potencial eólico. Essas aplicações estão bastante relacionadas ao setor energético (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

O avanço da tecnologia traz conseqüências importantes para o estudo de previsão de ventos, como o avanço na área computacional, que acarretou um aumento significativo na precisão e confiabilidade das estimativas de dados de vento. Pode-se também citar como uma importante conseqüência uma maior cobertura na coleta de dados meteorológicos, onde se utilizam principalmente PCDs e dados provenientes de satélites artificiais.

As PCDs são dispositivos eletrônicos que permitem a coleta e a transmissão automática de dados hidrometeorológicos e ambientais. São fixadas na superfície e operam de forma automatizada, transmitindo seus dados, normalmente, através de satélites.

No Ceará, tem-se uma rede de PCDs operada pela FUNCEME. Esta rede é formada por 76 estações distribuídas em quatro tipos: meteorológicas; agrometeorológicas; hidrometeorológicas; e agrohidrometeorológicas, dependendo do conjunto de sensores utilizados. As PCDs coletam automaticamente dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, precipitação, radiação solar, temperatura do solo, umidade do solo e fluxo de calor no solo, dentre outros. Os dados de velocidade e direção do vento são obtidos a 10 m de altura, como citado anteriormente.

Para a previsão de energia eólica, utiliza-se da previsão de dados de velocidade e direção do vento que são fornecidos através de simulações em modelos numéricos regionais, os quais constituem uma ferramenta extremamente importante para avaliação de potencial eólico de uma região. Modelos numéricos de mesoescala são largamente utilizados para modelagem regional das condições meteorológicas em áreas limitadas, abrangendo desde centenas de quilômetros até continentes inteiros.

4.2 Cálculo do potencial eólico

As simulações numéricas realizadas com o modelo atmosférico RAMS, utilizando dados referentes ao ano de 2006, tiveram por finalidade extrair dados de velocidade do vento em torno de 50 e 80 m de altura, referentes as cidades de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova, devido à altura dos eixos da maioria dos aerogeradores instalados no Ceará se situarem nesse intervalo. Os resultados do modelo forneceram dados nas seguintes alturas: 53,8 e 79,2 m, o que foi considerada uma boa aproximação. Estes dados foram obtidos através das simulações realizadas com as configurações citadas nas Tabs. 3 e 4.

Os dados fornecidos pelas simulações serão usados para se estudar a disponibilidade de energia eólica existente nesses município. Como visto anteriormente, estas cidades foram escolhidas a partir das estudadas por Vasconcelos Júnior (2010), tendo como parâmetro, os maiores perfis de consumo de energia elétrica, em MWh/ano.

Os dados utilizados para avaliar o consumo de energia das cidades foram extraídos do anuário estatístico do Ceará 2008 (IPECE, 2008), que contém dados referentes ao ano de 2006.

A Tab. 5 expõe o perfil de energia elétrica consumida no ano de 2006 pelas cidades de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova.

Tabela 5 – Consumo de energia elétrica no ano de 2006. Fonte: IPECE (2008).

Cidade	Consumo – MWh/ano
Icapuí	42,049
Jaguaruana	33,929
Morada Nova	34,919

Fatores físicos e geológicos interferem na disponibilidade de energia eólica de uma região. Este tipo de energia se forma através da diferença de aquecimento da superfície terrestre, diferença esta que faz mudar a densidade do ar. Essa diferença de densidade proporciona um deslocamento de massas de ar, movimento este que contém uma energia cinética (E_c) envolvida, que pode ser expressa por (ALDABÓ, 2002).

$$E_c = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

onde m representa a massa de ar que passa por uma área (A) de varredura das pás em rotação, e temos v como a velocidade do vento. Para o caso do potencial eólico, a área (A) de varredura das pás é igual a πD^2 , onde D representa o diâmetro do rotor. Obtém-se essa massa (m) de ar, que passa pelas pás, através da seguinte fórmula

$$m = A \times \delta \times v \quad (2)$$

onde δ representa a densidade do ar; v é a velocidade; A é a área de varredura das pás.

Como potência é fornecida pela razão entre a energia e o tempo, tem-se que a potência dos ventos será a energia cinética (E_c) dividida pela variável tempo (t), como

$$P_{vento} = \frac{mV^2}{2t} \quad (3)$$

Observando as relações de taxa de fluxo de massa (m') e taxa de fluxo volumétrico (Q), pode-se obter a expressão utilizada para o cálculo do potencial eólico. A razão entre a massa (m) e o tempo (t), pode ser definida como a taxa de fluxo de massa. A quantidade de ar que passa por uma determinada área é por definição a taxa de fluxo volumétrico (Q), dada por

$$Q = v \times A \quad (4)$$

Por definição a taxa de fluxo de massa pode ser calculada utilizando o produto do fluxo volumétrico (Q) pela densidade do ar (ρ), onde assim pode-se concluir que a taxa de variação da massa pode ser obtida por

$$\dot{m} = \left(\frac{m}{t} \right) = \rho \times A \times v \quad (5)$$

Relacionando as Eqs. (3.3) e (3.5), pode-se estabelecer o potencial eólico por

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (6)$$

Na Eq. (3.6) o potencial eólico não é obtido em watt. Para se encontrar o valor do potencial nesta unidade é preciso levar em consideração as eficiências mecânicas e elétricas do sistema (η) e o coeficiente de desempenho aerodinâmico (C_p). Este último coeficiente depende da velocidade do vento, rotação e parâmetros de controle da turbina (SALLES, 2004).

Levando em consideração os parâmetros influentes no C_p , é usual que os fabricantes dos aerogeradores informem a curva de potência dos mesmos, onde esse coeficiente indica a quantidade de energia produzida pelo aerogerador em uma determinada velocidade.

Essa curva de potência é medida por um anemômetro que fica localizado na frente da turbina, onde haja pouca intensidade de turbulência. O gráfico gerado por essa curva estabelece a relação entre a velocidade do vento (m/s) e a potência (kW), onde esse estudo é um fator essencial para determinar o potencial médio produzido por uma turbina (SALLES, 2004).

Na avaliação do potencial eólico de um local, é essencial conhecer a distribuição da frequência de velocidade do vento em um período de tempo, pois esse fator indica quanto a viabilidade do local para geração de energia eólica. A distribuição de Weibull é uma das que melhor demonstra o comportamento dos ventos (SALLES, 2004).

Essa distribuição de Weibull é uma ferramenta muito importante para análise da potência eólica e geração de energia, sendo bastante aceito nos estudos de energia eólica para avaliar a distribuição de velocidade dos ventos e suas características. A função da distribuição de Weibull depende extremamente de dois parâmetros, k e c . O fator de forma (k) representa a regularidade dos ventos, quanto maior for este valor, melhor será a regularidade da velocidade do vento (DALMAZ, 2007). Ela é dada por

$$f(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (7)$$

Para se estudar o potencial eólico é importante se conhecer algum mecanismo de caracterização dos ventos, como por exemplo, a distribuição estatística de Weibull, bem como os fatores que influenciam a intensidade dos mesmos, dentre eles a rugosidade.

A rugosidade representa o quanto de irregularidades existe na superfície de um local, como por exemplo, relevo, construções, presença de vegetação. Há duas relações que podem ser usadas para avaliar a rugosidade: classe e comprimento de rugosidade. Essa classe de rugosidade pode ser representada entre os valores de 0 a 4, onde os locais que não apresentam elementos para interferir na sua velocidade estão na classe 0. Um local que possua muitos elementos de interferência serão inseridos na classificação 4.

O comprimento de rugosidade é determinado pela altura acima da superfície do solo onde a velocidade do vento seja nula. Quanto menor for considerada a altura, mais a velocidade será afetada pela rugosidade do local e a velocidade será menor (LEITE, 2005).

Para a escolha da potência do aerogerador a ser utilizado no Windographer®, analisou-se o MWh/ano gasto por cada cidade em estudo, de acordo com a Tab. 5.

O aerogerador da Enercon, modelo E-70, possui uma potência de 2.300 kW, tendo sido escolhido tanto pela sua capacidade de produção, quanto pela sua aceitação atual no mercado. A Enercon é uma empresa americana fundada em 1984, que fabrica aerogeradores de pequeno, médio e grande porte.

Esse aerogerador possui uma curva de potência que demonstra a sua potência máxima de 2.300 kW, quando a velocidade está em aproximadamente 15 m/s, havendo após o alcance dessa máxima potência, uma estagnação no

desenvolvimento da mesma, como demonstrado na Fig. 2.

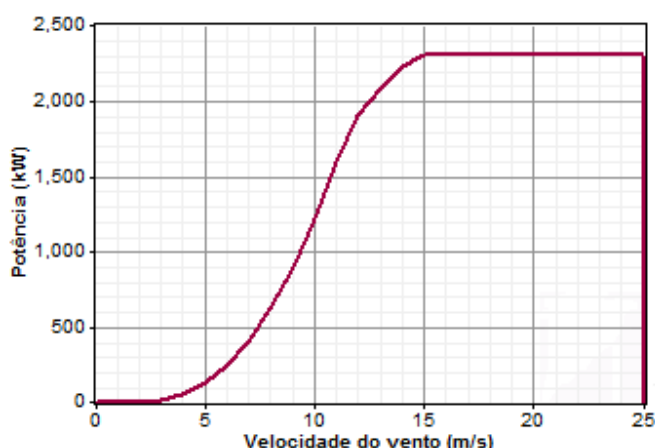


Figura 2 – Curva de potência (C_p) do aerogerador E-70.

5.0 RESULTADOS

Observando-se os dados referentes às médias horárias da velocidade do vento, nas cidades de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova, respectivamente, conclui-se que o aumento da intensidade do vento se inicia por volta de 12 h em 50 e 80 m. Nas cidades de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova, as máximas intensidades nessas alturas ocorrem, respectivamente, por volta de 21 h, 16 h e 19 h, com valores sempre acima de 6 m/s.

Nos meses do segundo semestre, são observadas as maiores médias de velocidade do vento. Este semestre, é considerado neste trabalho como o período seco do ano, onde os níveis dos reservatórios das hidrelétricas se encontram mais comprometidos. Os ventos que ocorrem no segundo semestre apresentam maiores intensidades, sendo assim, propícios para a utilização dessa fonte de energia, concomitante à utilização da energia hidrelétrica.

Como visto na abordagem sobre o vento Aracati, retoma-se a idéia de ser um fenômeno que ocorre normalmente nos fins das tardes e início de noites quentes, em épocas secas do ano. Analisando-se os dados referentes à média da velocidade horária e mensal, conclui-se que o comportamento do vento nas três cidades estudadas, nas alturas de 50 e 80 m, assemelham-se com as características do vento Aracati.

Observa-se que o vento nas cidades estudadas se comporta de uma forma muito favorável à produção de energia eólica, uma vez que apresenta pouca variabilidade na direção, favorecendo a implantação de grandes número de aerogeradores, sem que a esteira de turbulência causado por um deles afete o outro.

A média mensal de produção de energia, com base na utilização do aerogerador E-70, nas alturas de 50 e 80 m para meses do segundo semestre é notório a elevada produção, isso ocorre devida as elevadas intensidades da velocidade do vento ocorrerem no neste mesmo período.

Após a avaliação das variáveis velocidade e direção, conclui-se que as cidade de Icapuí, Jaguaruana e Morada Nova possuem ventos favoráveis para utilização na produção de energia eólica.

Relacionando os dados referentes ao consumo de energia elétrica por cidade e a produção de energia, verificou-se a quantidade de aerogeradores do tipo E-70 necessários para produzir energia elétrica consumida pelas cidades.

Para implantação de aerogeradores na altura de 50 m, para suprir a demanda das cidades estudadas, necessita-se de uma quantidade bem superior de máquinas do que aquelas implantadas nas alturas de 80 m, concluindo-se, como esperado, que o vento em maiores altitudes são melhores para produção de energia elétrica nas cidades que ocorrem o fenômeno do vento Aracati, o que nota-se em todas as cidades em estudo conforme abordado nas Tabs. 6,7 e 8.

Tabela 6 – Produção de energia eólica da cidade de Icapuí.

Altura	50 m	80 m
Energia gerada por unidade de aerogerador E-70 ao ano (MWh)	2,150	3,350
Quantidade de aerogeradores E-70 para suprir a demanda	20	13
Energia total ao ano (MWh)	43,000	43,550

Tabela 7 – Produção de energia eólica da cidade de Jaguaruana.

Altura	50 m	80 m
Energia gerada por unidade de aerogerador E-70 ao ano (MWh)	1,677	2,907
Quantidade de aerogeradores E-70 para suprir a demanda	21	12
Energia total ao ano (MWh)	35,217	34,884

Tabela 8 – Produção de energia eólica da cidade de Morada Nova.

Altura	50 m	80 m
Energia gerada por unidade de aerogerador E-70 ao ano (MWh)	1,265	2,130
Quantidade de aerogeradores E-70 para suprir a demanda	28	17
Energia total ao ano (MWh)	35,420	36,210

6.0 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ (ADECE). Ceará passa a liderar a produção de energia eólica no país. 2009. Disponível em: <<http://www.adece.ce.gov.br/noticias/texto.php?Noticia=149>>. Acesso em: 24 fev. 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília, 2008. 236 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em: 24 fev. 2010.
- ALCÂNTARA, R. C.; SOUZA, E. P. Uma Teoria Termodinâmica para brisas: Teste utilizando simulações numéricas. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, n. 1, p. 1–11, 2008.
- ALDABÓ, R. Energia eólica. [S.l.: s.n.], 2002.
- ANTHES, R.; WARNER, T. T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. Monthly Weather Review, v. 106, n. 8, p. 1045–1078, 1994.
- BLACK, T. L. The new NMC mesoscale eta model: Description and forecast examples. Weather Forecasting, n. 9, p. 265–278, 1994.
- BRACKMANN, R. et al. Avaliação do potencial eólico na região central do Rio Grande do Sul – Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, VIII., 2009, Uberlândia. Anais eletrônicos... Uberlândia: UFU, 2009.
- CAMELO, H. N. Estudo Numérico do Vento Aracati para Caracterização de seu Potencial Eólico. 71 f. Dissertação (Mestre em Ciências Físicas Aplicadas) — Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, Maio 2007.
- CAMELO, H. N. et al. Análise estatística da velocidade de vento do estado do Ceará. Tecnologia, v. 29, n. 2, p. 211–223, dezembro 2008.
- COTTON, W. R. et al. RAMS 2001: Current status and future directions. Meteorology and Atmospheric Physics, v. 82, n. 1-4, p. 5–29, 2003.
- CUNHA, E. B. A. C. Investigação do Potencial Eólico de Região Serrana no Ceará. Dissertação (Mestre em Ciências Físicas Aplicadas) — Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, Janeiro 2008.

- DALMAZ, A. Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- DAVIES, P. A. Development and mechanisms of the nocturnal jet. *Meteorological Applications*, v. 7, n. 3, p. 239–246, 2000. English.
- DE MARIA, P. H. S.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S. Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 4, p. 477–489, 2008.
- DUDHIA, J. A nonhydrostatic version of the Penn State–NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an atlantic cyclone and cold front. *Monthly Weather Review*, v. 121, n. 5, p. 1493–1513, 1993.
- FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília, 2002. 68 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0005/5181.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2007.
- GATTO, L. C. S. Diagnóstico Ambiental da Bacia do Rio Jaguaribe. Salvador: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1999. 77 p. Disponível em: <<ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/diagnosticos/jaguaribe.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2008.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no brasil. *Estudos Avançados*, v. 21, p. 07–20, 2007.
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). Anuário Estatístico do Ceará. Fortaleza, 2008. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/anuario/anuario2008/index.htm>>. Acesso em: 24 fev. 2010.
- LEITE, P. Modelagem de fazendas eólicas para estudo de confiabilidade. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril 2005.
- MARTINS, F.; GUARNIERI, R.; PEREIRA, E. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, p. 1304–1 – 1304–13, 2008.
- MARTINS, R. et al. Projeto SONDA – Rede nacional de estações para coleta de dados meteorológicos aplicados ao setor de energia. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. I Congresso Brasileiro de Energia Solar. [S.l.], 2007.
- MIRANDA, P. M. A.; JAMES, I. N. Non-linear three-dimensional effects on gravity-wave drag: Splitting flow and breaking waves. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 508, n. 118, p. 1057–1081, 1992.
- PIELKE, R. A. et al. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 49, n. 1-4, p. 69–91, 1992.
- SALLES, A. C. N. de. Metodologias de análises de risco para avaliação financeira de projetos de geração eólica. Dissertação (Mestrado) — Universidade federal do Rio de Janeiro, 2004.
- SCHMIDT, C.; LIMA, M. A demanda por energia elétrica no brasil. *Revista Brasileira de Economia*, v. 58, p. 67–98, 2004.
- SECRETARIA DA INFRA-ESTRUTURA — GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Atlas do Potencial Eólico do Ceará. 2001. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/downloads/category/3-energia?download=10%3AAtlas-do-potencial-eolico-do-ceara>>. Acesso em: 11 nov. 2008.
- TOLEDO, E. M.; ALVES, C. M.; TEIXEIRA, F. V. B. Um experimento sobre a influência do domínio na previsão do RAMS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI., 2000, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: SBMET, 2000.
- VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. Estudo numérico de jatos de baixos níveis no estado do Ceará. 127 f. Dissertação (Mestre em Ciências Físicas Aplicadas) — Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, Fevereiro 2010.

Abstract: In the inland Ceará state, there is an phenomenon well known by inhabitants, mainly by those that living near the Jaguaribe river basin, called Aracati wind. In the literature, it has two descriptions about its mechanisms, one associating it with a sea breeze, and another approach characterizing it as being associated with a Low-Level Jet (LLJ). In this work, we have to analyze the wind potential at 50 and 80 m in height in some towns that are in the Jaguaribe river basin, since there is no record of data collected at desired times in this region. It was used the model features found in the literature, validated and that better represent the meteorological variables over the Jaguaribe river basin, in order to perform the simulations in 2006 in the cities: Jaguaruana, Morada Nova e Icapuí. After obtaining the model results, in order to study the wind potential in these cities, Windographer software was used to obtain data for energy generation using the wind turbine model E-70 Enercon. The energy consumption data in the cities studied were taken from the Ceará Statistical Yearbook from 2008, and compared to those obtained from simulations. The use of these towns to wind power generation is better if winds to 80 m high were used, since they have the highest rate and it is necessary to have a lower amount of wind to generate the demand to supply the cities, compared to necessary to 50 m high.

Keywords: Numerical Modeling, Aracati Wind, Wind Potential.