



**Variabilidade da Velocidade do Vento e Influências Oceânicas:  
Uma Abordagem Para Fins de Geração de Energia Elétrica no Nordeste do Brasil**  
Wind Speed Variability and Ocean Influences:  
An Approach for Electrical Energy Generation Purposes in Northeastern Brazil

Enilson Palmeira Cavalcanti; Bernardo Barbosa da Silva;  
Vicente de Paulo Rodrigues da Silva<sup>1</sup> & José Batista Chaves Filho

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas,  
Av. Aprígio Veloso 882, 58.429-140, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, Brasil  
E-mails: [enilson.cavalcanti@ufcg.edu.br](mailto:enilson.cavalcanti@ufcg.edu.br); [bernardo.silva@ufcg.edu.br](mailto:bernardo.silva@ufcg.edu.br);  
[vicente.paulo@ufcg.edu.br](mailto:vicente.paulo@ufcg.edu.br); [zefilhometeo@hotmail.com](mailto:zefilhometeo@hotmail.com)  
Recebido em: 03/07/2019    Aprovado em: 24/09/2019  
DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_1\\_273\\_285](http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_273_285)

## Resumo

Informações sobre o potencial eólico de uma região são relevantes para o gerenciamento e monitoramento em parques eólicos para fins de geração de energia elétrica. Neste trabalho foram utilizados dados da velocidade do vento a 10 m de altura da superfície, oriundos do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) ERA-Interim, para avaliar a sua variabilidade sazonal e interanual na Região Nordeste do Brasil. Os resultados obtidos indicam que a primavera é a estação do ano com maior intensidade do vento, enquanto que o outono é a de menor intensidade. Em anos de atuação de El Niño o vento é mais intenso que o valor médio (ultrapassando 45% no outono e até 25% na primavera), enquanto que em anos de La Niña esse ficou abaixo da média nas áreas com maior potencial eólico médio (40% no outono e de até 30% na primavera). Os episódios de Gradiente/Dipolo de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Atlântico positivo acarretam ventos mais intensos que o normal (até 35% na parte norte da região), contrário aos anos de eventos de Gradiente/Dipolo negativo onde os ventos ficam com intensidade abaixo da média (até 40% no outono).

**Palavras-chave:** energia eólica; vento à superfície; temperatura do mar

## Abstract

The determination of the wind energy potential is relevant to the management and monitoring of wind farms, particularly for the purpose of electricity generation. In this work, the 10m-wind speed data, obtained from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim, were used to evaluate its seasonal and interannual variability in the Northeast region of Brazil. The results indicate that spring is the season with the highest wind intensity, while autumn is the season with the lowest wind intensity. During El Niño years the wind is stronger than average (exceeding 45% in the autumn and up to 25% in the spring), while in La Niña years it is below average in areas with higher average wind potential (40% in the autumn and up to 30% in the spring). Positive Atlantic Ocean Sea Surface Temperature (SST) Gradient / Dipole episodes bring more intense than normal winds (up to 35% in the northern part of the region), as opposed to years of negative Gradient / Dipole events where winds are below average (until 40% in the autumn).

**Keywords:** wind power; surface wind; sea temperature

## 1 Introdução

A energia elétrica produzida no Brasil, necessária para atender a demanda nacional, é de 160 GW (Bezerra, 2018), e apresenta grande dependência das condições meteorológicas que propiciem chuvas suficientes para garantir uma vazão regular, em especial no período de estiagem. Ocorre que nem sempre a recarga plena dos reservatórios é possível, dadas as situações registradas em anos de condições climáticas desfavoráveis, dificultando o atendimento da demanda por energia elétrica e acarretando aumento nas tarifas de energia. Uma complementação para atender a essa demanda energética é feita através de usinas térmicas (25,86%), parques eólicos (8,21%) e outras fontes (2,06%), como nuclear e solar (Mathiesen *et al.*, 2011; Bezerra, 2018).

A fonte eólica vem gradualmente assumindo maior espaço na matriz elétrica brasileira. A exploração eólica no Brasil teve início em 1992, com a instalação de uma turbina na ilha de Fernando de Noronha – PE (Silva, 2003). Um passo importante para esse avanço foi dado com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Segundo Camargo (2005), o principal destaque do PROINFA é a energia eólica. Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) assume o controle desse sistema de geração de energia elétrica.

Na década de noventa, a energia elétrica gerada no Nordeste do Brasil provinha quase que exclusivamente da fonte hídrica, tendo o rio São Francisco como o seu principal provedor. Esse quadro de liderança majoritária da fonte hídrica no Nordeste tem mudado nos últimos anos. De fato, a participação das termelétricas e da fonte eólica tem crescido de forma significativa na composição da geração de energia elétrica no Subsistema Nordeste, em razão da ocorrência de anos de baixa pluviometria e do aumento da capacidade instalada de geração eólica na região. Nesse contexto, a fonte eólica, embora represente atualmente cerca de 1/3 da potência instalada no Nordeste, é a que mais está contribuindo para a geração de energia elétrica, tendo participado, em 2017, com 45,37% do total gerado no Subsistema Nordeste (ANEEL, 2018).

Alguns fatores delimitam o melhor aproveitamento do potencial eólico. Um deles é o espaço físico para serem instalados os aerogeradores, pois são

estruturas com dimensões e custos elevados. Outro fator fundamental é que a localização para instalação dos aerogeradores deve dispor de uma velocidade média anual dos ventos de no mínimo 3,6 m/s na altura de 10 m (Nascimento *et al.*, 2012).

Vários estudos comprovaram a existência de adequada potencialidade da Região Nordeste do Brasil para a geração de energia elétrica mediante a força do vento, ou seja, a fonte eólica. Silva *et al.* (2002, 2004) analisaram o potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro e sua espacialização. Para tanto, utilizaram 77 estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981. Os resultados evidenciam áreas propícias para a geração de energia.

Lima *et al.* (2012) utilizaram essa mesma fonte de dados do INMET para comparação com simulações numéricas realizadas com o modelo *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS) para o estado da Paraíba. Mariano & Cavalcanti (2017) compararam informações do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF, ERA-Interim) com medições em três torres anemométricas situadas nas localidades de Damião, Juazeirinho e Teixeira para o mês de outubro de 2010, também, na Paraíba. Os resultados incentivam o uso do ERA-Interim para estudos de vento.

Segundo Lucena & Lucena (2019) a capacidade instalada de energia eólica no Brasil até outubro de 2018 é de 14.338,8 MW, o Nordeste do Brasil participa com 12.238,8 MW, o que representa 85,3% do total sendo liderado pelo Rio Grande do Norte, seguido por Bahia e Ceará.

Além do efeito de sazonalidade, existe uma variabilidade interanual da precipitação relacionada a fenômenos externos à região, como o “El Niño”/ Oscilação do Sul (ENOS) que se forma no Oceano Pacífico (Rasmusson & Carpenter, 1982; Tremberth & Shea, 1987; Philander, 1990; Alves *et al.*, 1997) e o “Dipolo” do Oceano Atlântico tropical (Moura & Shukla, 1981). Esses fenômenos atmosféricos/oceânicos estão associados à qualidade da estação chuvosa do Nordeste do Brasil. Em anos de “El Niño”, o Índice de Oscilação do Sul (IOS), dado pela diferença da pressão atmosférica entre Tahiti (18° S, 150° W) e Darwin (12° S, 130° E), é negativo, indicando alte-

ração na circulação de Walker. Esse efeito é também indicado pela anomalia de temperatura da superfície do mar em áreas do Oceano Pacífico Tropical - Niño 1+2 (0°-10°S, 90°W-80°W); Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W); Niño 4 (5°N-5°S, 160°E-150°W) acarretando movimento descendente sobre a Região Nordeste do Brasil e, portanto, inibindo a convecção e a consequente atuação dos sistemas que produzem chuvas na região. Dessa forma, existe uma nítida associação entre a ocorrência desse fenômeno com índices de precipitação pluviométrica abaixo da média. Já o “Dipolo” do Atlântico (Atlântico Norte: 5°N-20°N, 60°W-30°W e Atlântico Sul: 0°-20°S, 30°W-10°E) atua inibindo a ocorrência de precipitação sobre o Nordeste do Brasil quando o Atlântico Tropical Norte está mais aquecido que o Sul (dipolo positivo), provocando a intensificação da circulação da Célula de Hadley no Hemisfério Sul, não permitindo que a ZCIT atinja o norte da Região Nordeste (fase quente). Efeitos contrários aos descritos (dipolo negativo) favorecem uma estação chuvosa com índices pluviométricos acima da média (Moura & Shukla, 1981; Rasmusson & Carpenter, 1982).

É evidente que as características climáticas mencionadas interferem, também, no comportamento dos ventos. Entretanto, essa problemática tem sido pouco estudada de forma regional pela inexistência de medições contínuas e espacialmente bem distribuídas da velocidade do vento a 10 m da superfície. Nesse contexto, as reanálises, que representam uma composição das diferentes plataformas de observação e a modelagem numérica da atmosfera, proporcionam uma fonte de informações confiáveis e fundamental para se investigar regionalmente os impactos que os mencionados fenômenos atmosféricos/oceânicos podem causar no comportamento do vento. Dee *et al.* (2011) destacam a reanálise ERA-Interim do ECMWF como uma das mais credenciadas fontes de dados com boa resolução espacial e temporal, nesse sentido, se adequam para o tipo de investigação abordado no presente estudo. Mariano & Cavalcanti, (2017) fizeram comparações do ERA-Interim com observações em três torres anemométricas situadas nas localidades de Damião, Juazeirinho e Teixeira no Estado da Paraíba e encontraram coeficientes de correlações significativas (teste *t* de Student para 99%,  $\alpha=0,01$ ) de 0,89; 0,82 e 0,94, respectivamente.

Portanto, objetiva-se com a presente pesquisa proporcionar informações sobre a disponibilidade

média do vento a 10 m de altura da superfície e avaliar características da variação sazonal e interanual relacionadas a casos de aquecimento e resfriamento anômalos das águas superficiais dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical.

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Área de Estudo

O estudo compreende a Região Nordeste do Brasil, que se localiza entre os paralelos 01° 02' 30" de latitude Sul e 18° 20' 07" de latitude Sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24", a Oeste do meridiano de Greenwich (Figura 1). Limita-se a Norte e a Leste com o Oceano Atlântico, ao Sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a Oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás. Segundo dados do IBGE (2018), a população estimada na Região Nordeste é de 56.760.780 habitantes, ocupando uma área de 1.561.177,8 km<sup>2</sup>, que equivale a 18,3% do território nacional.

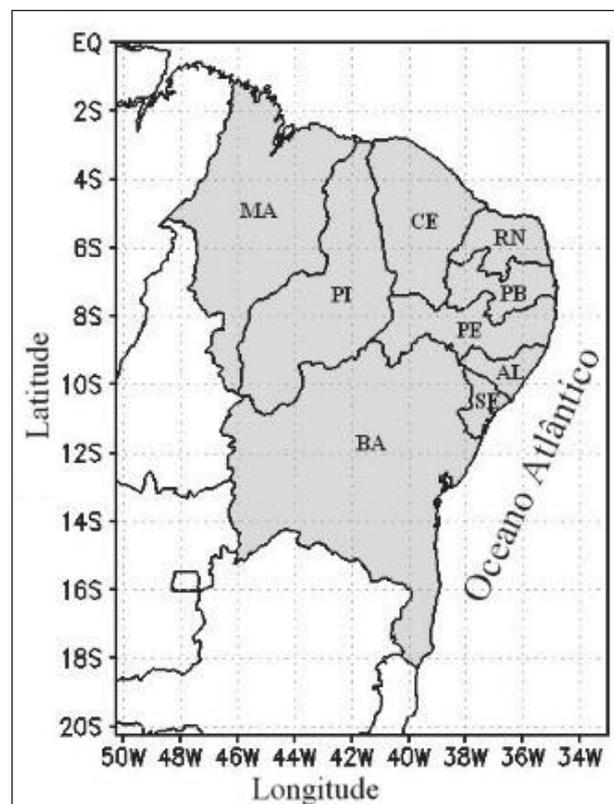


Figura 1 Região Nordeste do Brasil com os respectivos estados do Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA).

## 2.2 Dados

Com o intuito de analisar a intensidade do vento e sua variabilidade sazonal e interanual na Região Nordeste do Brasil, utilizaram-se informações de Reanálise ERA-Interim do ECMWF de um período climatológico de janeiro de 1979 a dezembro de 2015, com resolução espacial horizontal de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  de latitude e longitude, o que equivale a uma grade horizontal de 83,2 km por 83,2 km. As variáveis utilizadas correspondem às componentes zonal e meridional do vento médio diário para a altura de 10 metros em relação à superfície, cuja unidade é m/s e correspondem ao domínio espacial de  $0,00^\circ$  a  $20,25^\circ\text{S}$  e  $33,00^\circ\text{W}$  a  $50,25^\circ\text{W}$ .

Para a caracterização e escolha dos episódios de El Niño/La Niña e gradiente ou dipolo positivos e negativos (D+/D-) foram utilizados os dados dos índices de Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (ATSM) para as áreas do Niño 3 ( $5^\circ\text{N}$ - $5^\circ\text{S}$ ,  $150^\circ\text{W}$ - $90^\circ\text{W}$ ); Atlântico Norte ( $5^\circ\text{N}$ - $20^\circ\text{N}$ ,  $60^\circ\text{W}$ - $30^\circ\text{W}$ ) e Atlântico Sul ( $0^\circ$ - $20^\circ\text{S}$ ,  $30^\circ\text{W}$ - $10^\circ\text{E}$ ) do *National Weather Service NOAA, Center for Weather and Climate Prediction*. Segundo Oliveira & Costa (2011) o vento na Região Nordeste é melhor correlacionado com o Niño 3. O índice gradiente/dipolo foi obtido fazendo-se a diferença entre as anomalias, Atlântico Norte menos Atlântico Sul.

## 2.3 Análise Sazonal e Interanual

O efeito da sazonalidade foi apresentado pela espacialização da velocidade do vento média diária de janeiro de 1979 a dezembro de 2015, a 10 m acima da superfície, para as quatro estações do ano: verão (21 de dezembro a 20 de março); outono (21 de março a 20 de junho); inverno (21 de junho a 21 de setembro) e primavera (22 de setembro a 20 de dezembro), exceto em ano bissexto cujo início da primavera e do verão é deslocado de um dia à frente.

Para uma análise espacial da variabilidade interanual foram construídos mapas da anomalia do vento a 10 m. Foi decidido avaliar apenas dois episódios específicos referentes a cada caso: dois para El Niño; dois para La Niña; dois para Gradiente/Dipolo positivo (D+) e dois para Gradiente/Dipolo negativo (D-) escolhidos com base na Figura 2 que apresenta a série temporal das anomalias médias da temperatura da superfície do mar ( $^\circ\text{C}$ ) para as estações do ano de 1982 a 2015 nos Oceanos Atlântico e Pacífico tropi-

cais. Os eventos El Niño/La Niña escolhidos foram classificados usando critério proposto por Marcuzzo & Romero (2013). Por analogia foi definido critério para o gradiente/dipolo (Tabela 1). Procurou-se, também, na escolha minimizar o efeito do Atlântico sobre o Pacífico e vice-versa, no entanto, para os outonos de 1983 (El Niño), 1985 (gradiente/dipolo negativo) e 1989 (La Niña) não foi possível atender plenamente essa condição. Os episódios classificados se mostram coerentes com estudos de Ropelewski & Halpert (1987, 1989), Trenberth (1997), Souza (2003) e Patricola *et al.* (2014).

Eventos	Fraco ( $^\circ\text{C}$ )	Moderado ( $^\circ\text{C}$ )	Forte ( $^\circ\text{C}$ )
El Niño	0,5 a 0,9	1,0 a 1,4	$\geq 1,5$
La Niña	-0,5 a -0,9	-1,0 a -1,4	$\leq -1,5$
Gradiente/Dipolo positivo	0,3 a 0,5	0,6 a 0,8	$\geq 0,8$
Gradiente/Dipolo negativo	-0,3 a -0,5	-0,6 a -0,8	$\leq -0,8$

Tabela 1 Critério de classificação de El Niño/La Niña (Marcuzzo & Romero 2013) e de gradiente/dipolo positivo/negativo.

Os campos de anomalias do vento foram calculados para as quatro estações do ano. No entanto, só foram apresentados para os períodos extremos de menor intensidade (outono) e maior intensidade (primavera) referentes aos eventos escolhidos na Tabela 2. Ressalta-se que Oliveira & Costa (2011) também observaram ventos menos intensos durante os meses correspondentes à quadra chuvosa da região Nordeste, fevereiro a maio, e com maiores intensidades nos meses de agosto a outubro. Considerando que os eventos de El Niño/La Niña e dipolo positivo/negativo acontecem de um ano para o outro (frequentemente do início do segundo semestre de um ano até final do primeiro semestre do ano seguinte), optou-se em analisar a primavera do primeiro ano e o outono do ano seguinte por se concentrarem no período de ocorrência desses eventos. Portanto, a expressão utilizada para o cálculo em cada ponto da grade foi:

$$AV_{ij} = 100(V_{ij} - VM_i) / VM_i \quad (1)$$

em que  $AV_{ij}$  é a anomalia percentual da velocidade do vento da estação austral  $i$  e ano  $j$ ;  $V_{ij}$  é a velocidade do vento para a estação austral  $i$  e ano  $j$  e  $VM_i$  é a velocidade do vento para a estação austral  $i$  média dos anos de 1979 a 2015.

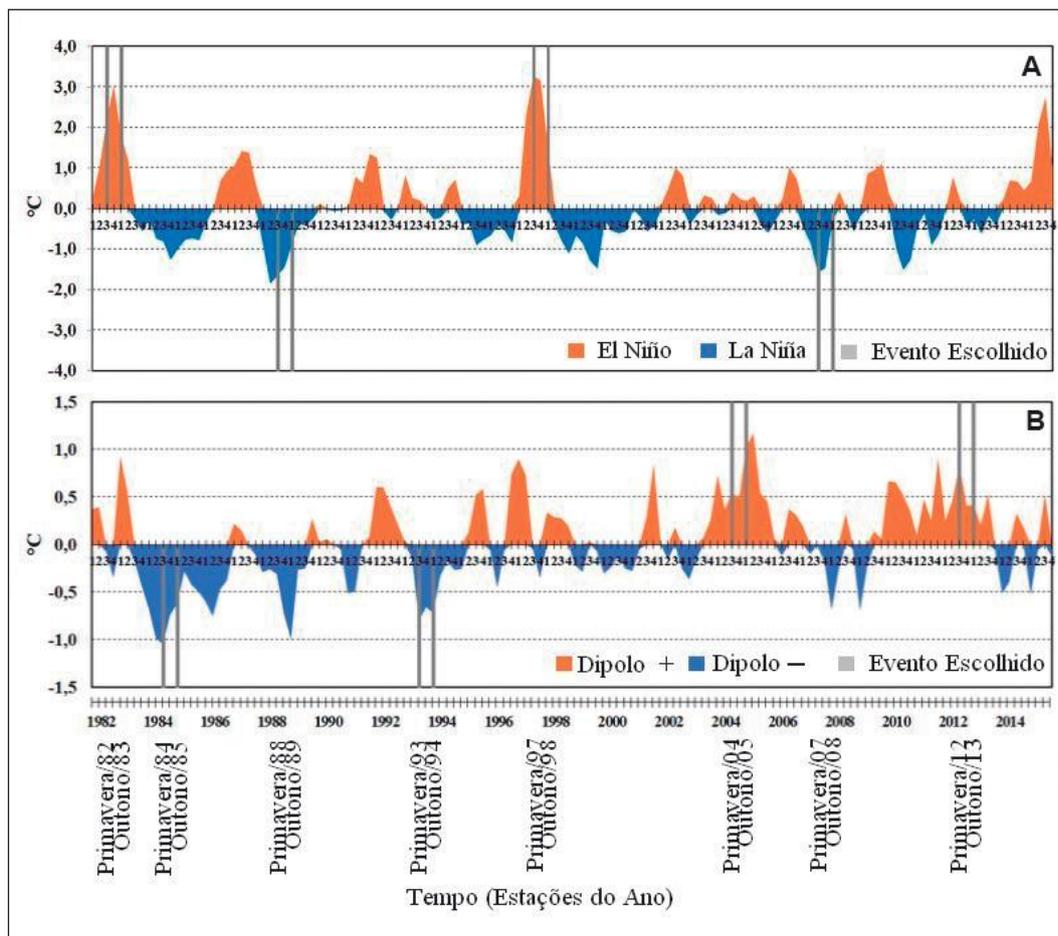


Figura 2 Anomalias médias da temperatura da superfície do mar – ATSM (°C) para as estações do ano 1, 2, 3 e 4 correspondem a Outono, Inverno, Primavera e Verão, respectivamente: A. Oceano Pacífico (Niño 3); e B. Oceano Atlântico (Gradiente/Dipolo) e os oito eventos selecionados.

		Primavera (22 de set. a 20 de dez.)		Outono (21 de mar. a 20 de jun.)			
		Ano	ATSM Pacífico	ATSM Atlântico	Ano	ATSM Pacífico	ATSM Atlântico
Oceano Pacífico	El Niño	1982	2,2 <sup>+</sup>	-0,1	1983	1,8 <sup>+</sup>	0,9 <sup>+</sup>
		1997	3,3 <sup>+</sup>	0,0	1998	1,6 <sup>+</sup>	0,3
	La Niña	1988	-1,6 <sup>+</sup>	-0,3 <sup>+</sup>	1989	-1,0 <sup>+</sup>	-1,0 <sup>+</sup>
		2007	-1,3 <sup>+</sup>	0,0	2008	-0,7 <sup>+</sup>	-0,2
Oceano Atlântico	D+	2004	0,4	0,5 <sup>+</sup>	2005	0,2	1,0 <sup>+</sup>
		2012	0,2	0,8 <sup>+</sup>	2013	-0,3	0,4 <sup>+</sup>
	D-	1984	-0,8 <sup>+</sup>	-1,0 <sup>+</sup>	1985	-1,0 <sup>+</sup>	-0,6 <sup>+</sup>
		1993	0,2	-0,8 <sup>+</sup>	1994	-0,3	-0,7 <sup>+</sup>

(<sup>+</sup>) forte, (<sup>o</sup>) moderado e (<sup>-</sup>) fraco

Tabela 2 Episódios selecionados e respectivos índices de ATSM para avaliação da anomalia da velocidade do vento a 10 m, referentes à primavera e ao outono. Valores em negrito destacam condições de forte a moderado.

### 3 Resultados e Discussão

Embora os dados utilizados apresentem uma resolução espacial de 0,75° x 0,75°, os resultados apresentam variações importantes ao longo do ano e entre anos investigados que foram influenciados pelo comportamento da TSM dos oceanos Atlântico e Pacífico tropicais. Essas informações possibilitam avaliar importantes aspectos da variabilidade sazonal e interanual; portanto, bastante relevantes no gerenciamento e planejamento de parques eólicos.

#### 3.1 Variação Sazonal

A distribuição espacial da velocidade do vento na altura de 10 m em relação à superfície para as quatro estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) é apresentada na Figura 3. Os valores estão expressos em m/s e correspondem à média para cada estação austral do período de 1979 a 2015. De modo geral, a configuração da distribuição espacial da ve-

Variabilidade da Velocidade do Vento e Influências Oceânicas:  
Uma Abordagem Para Fins de Geração de Energia Elétrica no Nordeste do Brasil

Enilson Palmeira Cavalcanti; Bernardo Barbosa da Silva; Vicente de Paulo Rodrigues da Silva & José Batista Chaves Filho

localidade do vento apresentada preserva semelhanças com o mapa da média anual, obtido por Amarante *et al.* (2001) para altura de 50 m.

Observam-se valores com maior intensidade (acima de 3,6 m/s) que se distribuem sobre o Planalto da Borborema e pelo litoral da região, sendo mais expressivos nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Nessas áreas se encontram instalados vários parques eólicos para geração de energia elétrica (Amarante *et al.*, 2001; Bezerra & Santos, 2017; Bezerra, 2018).

Os resultados mostram que a estação do ano que apresenta menor intensidade do vento é o outono em que a velocidade máxima cai para cerca de 5,0 m/s (Figura 3B), que em grande parte coincide

com o período chuvoso da parte Norte e Leste da região (Strang, 1972; Pereira & Cavalcanti, 2014). Nesse período predominam efeitos dinâmicos com a atuação da Zona de Convergência Intertropical e Distúrbios Ondulatórios de Leste que produzem convergência em baixos níveis ocasionando enfraquecimento na intensidade dos ventos em baixos níveis, caracterizando o outono como período crítico para a geração de energia eólica na região. Na primavera (Figura 3D), período mais seco da região, observam-se as maiores intensidades do vento, chegando a atingir cerca de 7 m/s, assim como, a expansão das áreas com velocidade maior que 3,6 m/s. O conhecimento dessa variabilidade sazonal é essencial no planejamento operacional de parques eólicos na região de estudo.

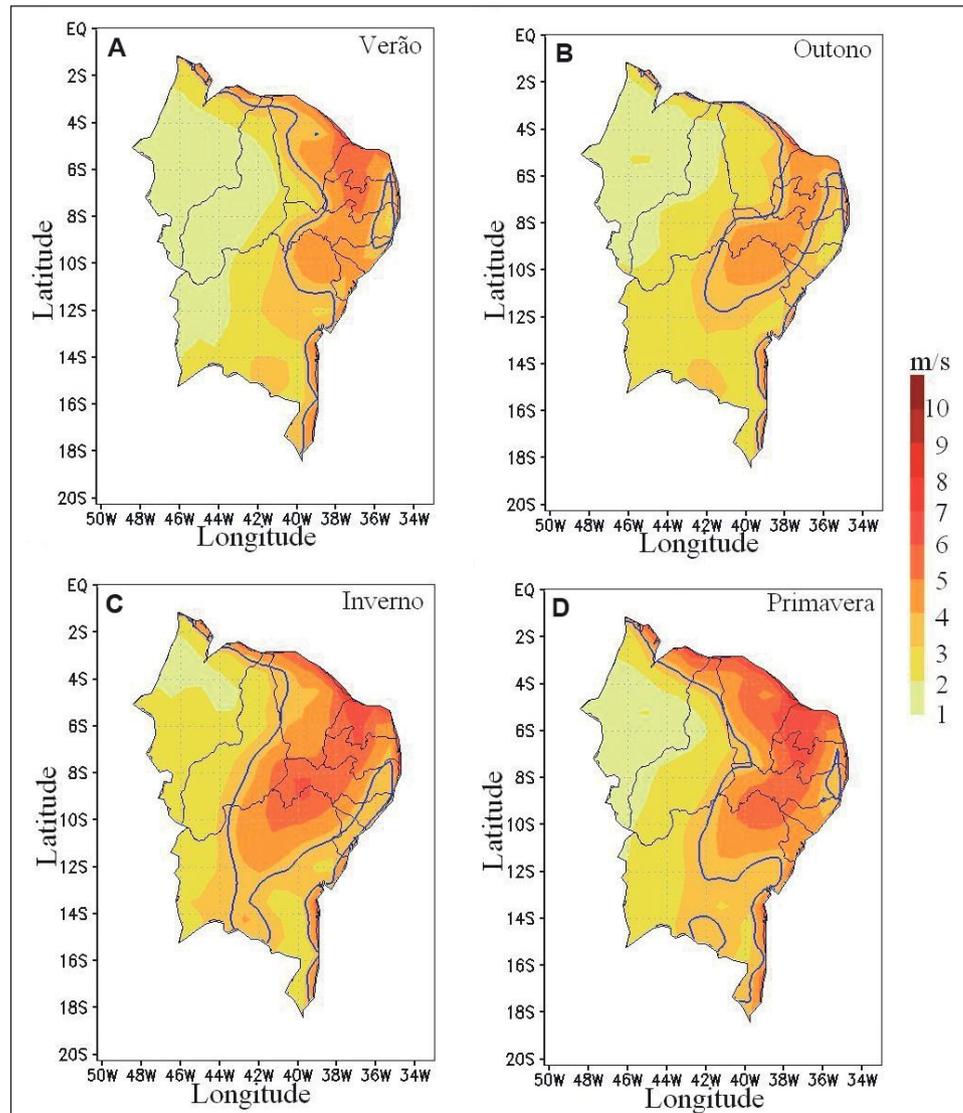


Figura 3 Climatologia da velocidade do vento (m/s) a 10 m para as estações do ano: A. verão; B. outono; C. inverno; D. primavera, de 1979 a 2015, linha azul corresponde ao limiar de 3,6 m/s.

### 3.2 Variação Interanual em Eventos de El Niño e La Niña

São apresentados aqui os campos da anomalia da velocidade do vento expresso em porcentagem da média do período para a altura de 10 m acima da superfície. As informações são relativas aos eventos de El Niño 1982/1983 e 1997/1998 considerados fortes (Figura 4) e os eventos de La Niña 1988/1989 e 2007/2008 considerados de forte a moderado, exceto o outono de 2008 que foi classificado como fraco (Figura 5). Como visto anteriormente (Figura 3), em média, a primavera corresponde a estação do ano que apresenta velocidades mais intensas na região, enquanto que o outono é a estação do ano de velocidades com menor intensidade, portanto, representam comportamentos extremos.

#### 3.2.1 Eventos El Niño

Pode-se observar nas Figura 4A e 4C que praticamente toda parte oeste da região Nordeste do Brasil apresentou anomalias negativas de vento nas primaveras de 1982 e 1997 correspondendo até 30% abaixo do valor médio, anos de atuação de El Niño (episódios fortes) com valores de ATSM de 2,2 e 3,3 °C, respectivamente (Tabela 2). No entanto, na parte Norte e Leste as anomalias do vento se mostraram positivas até 25% acima da média para a primavera/1982. Para a primavera de 1997 esse comportamento é menos acentuado (cerca de 10%), principalmente em áreas onde as intensidades do vento são mais fortes, conforme foi observado na Figura 3, onde justamente existe maior potencial de aproveitamento da energia eólica para a geração de energia elétrica.

Na estação do outono, que corresponde a estação de menor disponibilidade de vento (Figura 3B), os campos da anomalia do vento (Figura 4B e 4D) para os outonos de 1983 e 1998 (ATSM de 1,8 e 1,6 °C, respectivamente) apresentaram valores acima da média, chegando a ultrapassar 45% acima do valor médio, demonstrando claramente uma intensificação no vento nas partes norte e leste da Região Nordeste do Brasil. Esses resultados apontam que nos eventos de El Niño de 1982/1983 e 1997/1998

houve um favorecimento para a intensificação dos ventos nas áreas mais propícias para a geração de energia eólica.

#### 3.2.2 Eventos La Niña

Durante a primavera de 1988 (ATSM de -1,6 °C, episódio forte) praticamente toda a Região Nordeste do Brasil se mostra com anomalias negativas de até 30% abaixo do vento médio (Figura 5A). Entretanto, na La Niña de 2007 (Figura 5C), com valor de ATSM de -1,3 °C (episódio moderado), a Região Nordeste apresentou, na maior parte anomalias positivas do vento de até 35% acima da média no oeste da Bahia e centro do Maranhão, no entanto, nas áreas mais propícias à produção de energia este percentual cai para menos de 10%. Valores negativos de anomalia do vento foram observados apenas na área central do Ceará, norte do Piauí e nordeste do Maranhão. Para o outono (ATSM de -1,0°C para 1989 e de -0,7°C para 2008) os dois casos apresentados na Figura 5B e 5D mostram anomalias negativas em grande parte da Região Nordeste, exceto em parte do Piauí e na maior parte da Bahia para o outono de 1989 e a parte central do Piauí e centro-sul do Maranhão para o outono de 2008. As anomalias negativas de maior intensidade, cerca de 40% menor que o vento médio, foram observadas em áreas propícias para geração de energia elétrica tendo como fonte a energia eólica.

Nas áreas mais propícias para a geração de energia elétrica pela força do vento, em anos com atuação de La Niña (Figura 5), ocorre diminuição na intensidade do vento, exceto para a primavera de 2007.

### 3.3 Variação Interanual em Eventos de Gradiente do Atlântico

#### 3.3.1 Evento Gradiente/Dipolo Positivo

Na Figura 6 é apresentada a distribuição espacial da anomalia do vento para os eventos de Gradiente/Dipolo do Atlântico positivo para a primavera de 2004 (fraco) e outono de 2005 (forte) e primavera de 2012 (moderado) e outono de 2013 (fraco). Para as primaveras de 2004 e 2012 (ATSM de 0,5°

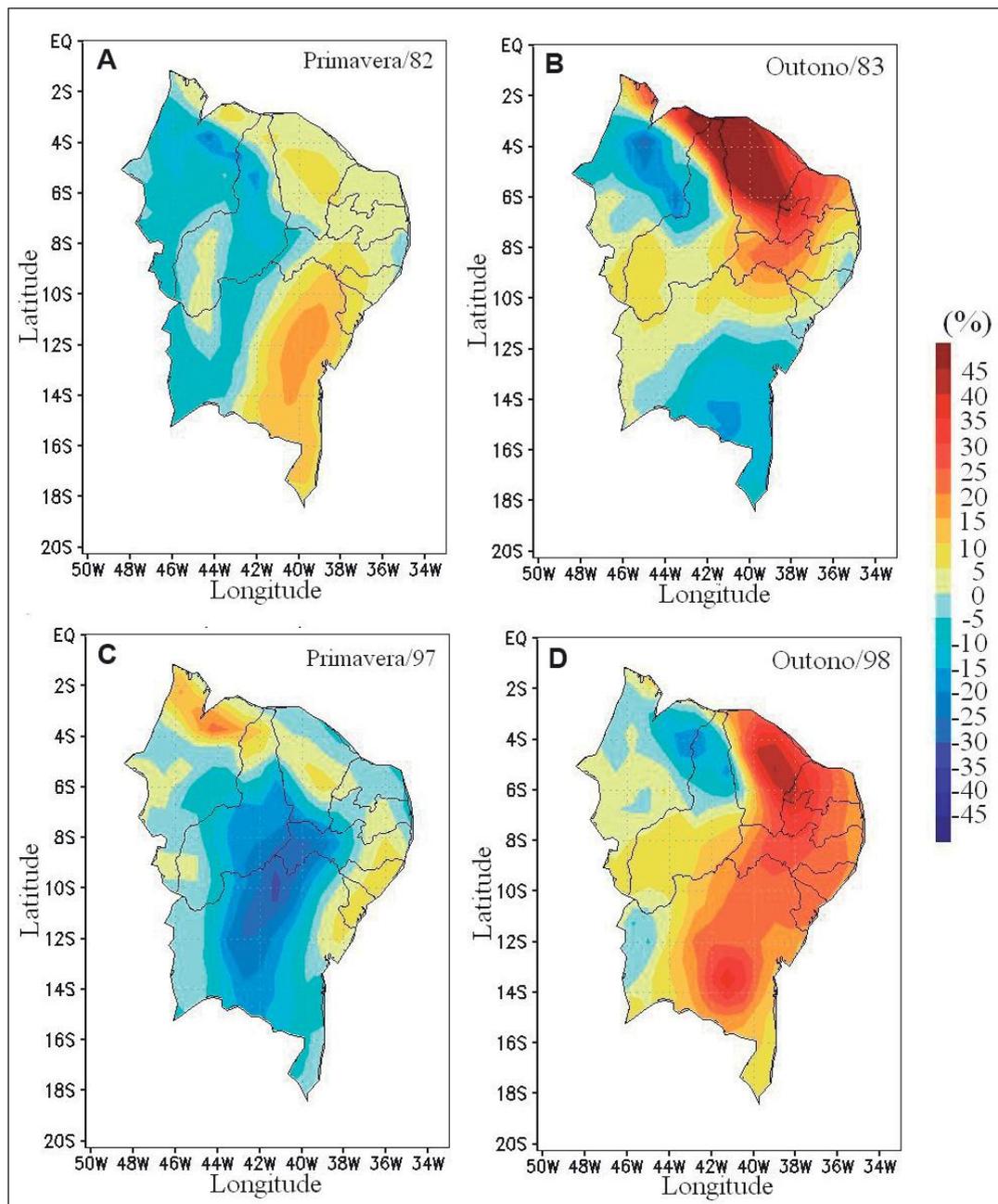


Figura 4 Distribuição espacial da anomalia do vento para anos de El Niño forte: A. primavera de 1982; B. outono de 1983; C. primavera de 1997; D. outono de 1998.

C e 0,8° C, respectivamente) e os outonos de 2005 e 2013 (ATSM de 1,0° C e 0,4° C, respectivamente), constatou-se em todos os casos que prevalece sobre a Região Nordeste do Brasil valores acima da média de até 35%. Os valores mais intensos, acima de 20%, encontram-se sobre a parte norte do Maranhão nas primaveras de 2004 e 2012, assim como, no outono de 2005 sobre o norte do Piauí e Ceará. Valores mais intensos até 15% são vistos sobre o Rio Grande do Norte no outono de 2013 e, também, sobre o litoral

do Nordeste para a primavera de 2012 na Paraíba e Pernambuco e para a Bahia no outono de 2013.

Os valores de anomalias negativas, da ordem de até 15% abaixo da média são vistos no sul do Ceará e oeste da Paraíba e Pernambuco nas primaveras de 2004 e 2012 e nas partes norte e sul da Bahia em 2012, essas áreas de anomalias negativas não chegam a cobrir 25% da área total da Região Nordeste do Brasil. Fica evidenciado que em eventos de gra-

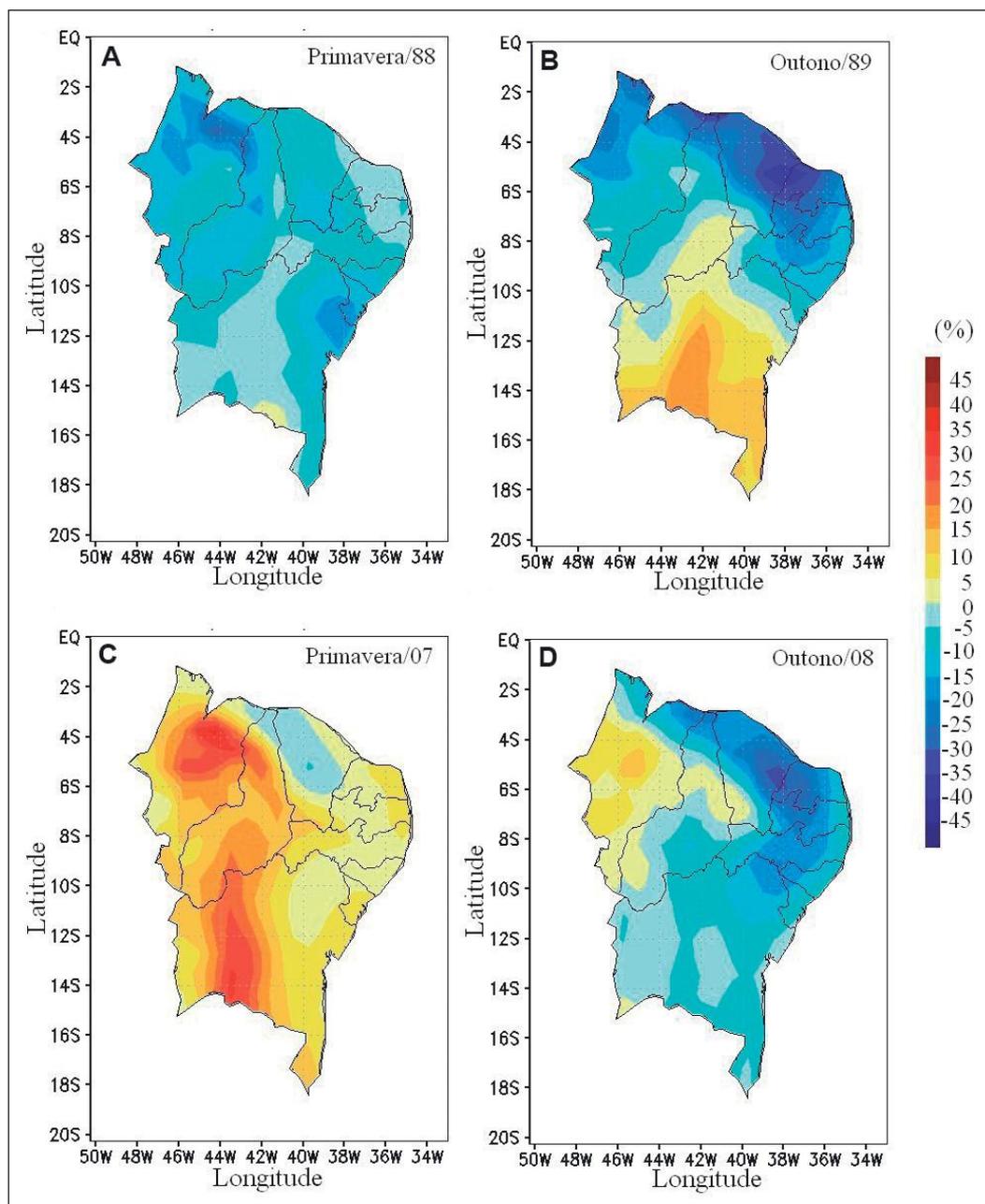


Figura 5 Distribuição espacial da anomalia do vento para episódios de La Niña: A. primavera de 1988 forte; B. outono de 1989 moderado; C. primavera de 2007 moderado; D. outono de 2008 fraco.

diente de anomalia positivo da temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical ou dipolo do Atlântico positivo, a velocidade do vento à superfície na Região Nordeste do Brasil fica, em geral, mais intensa que o normal.

### 3.3.2 Evento Gradiente/Dipolo negativo

Os episódios de Gradiente/Dipolo negativos da primavera de 1984 (forte), outono de 1985 (even-

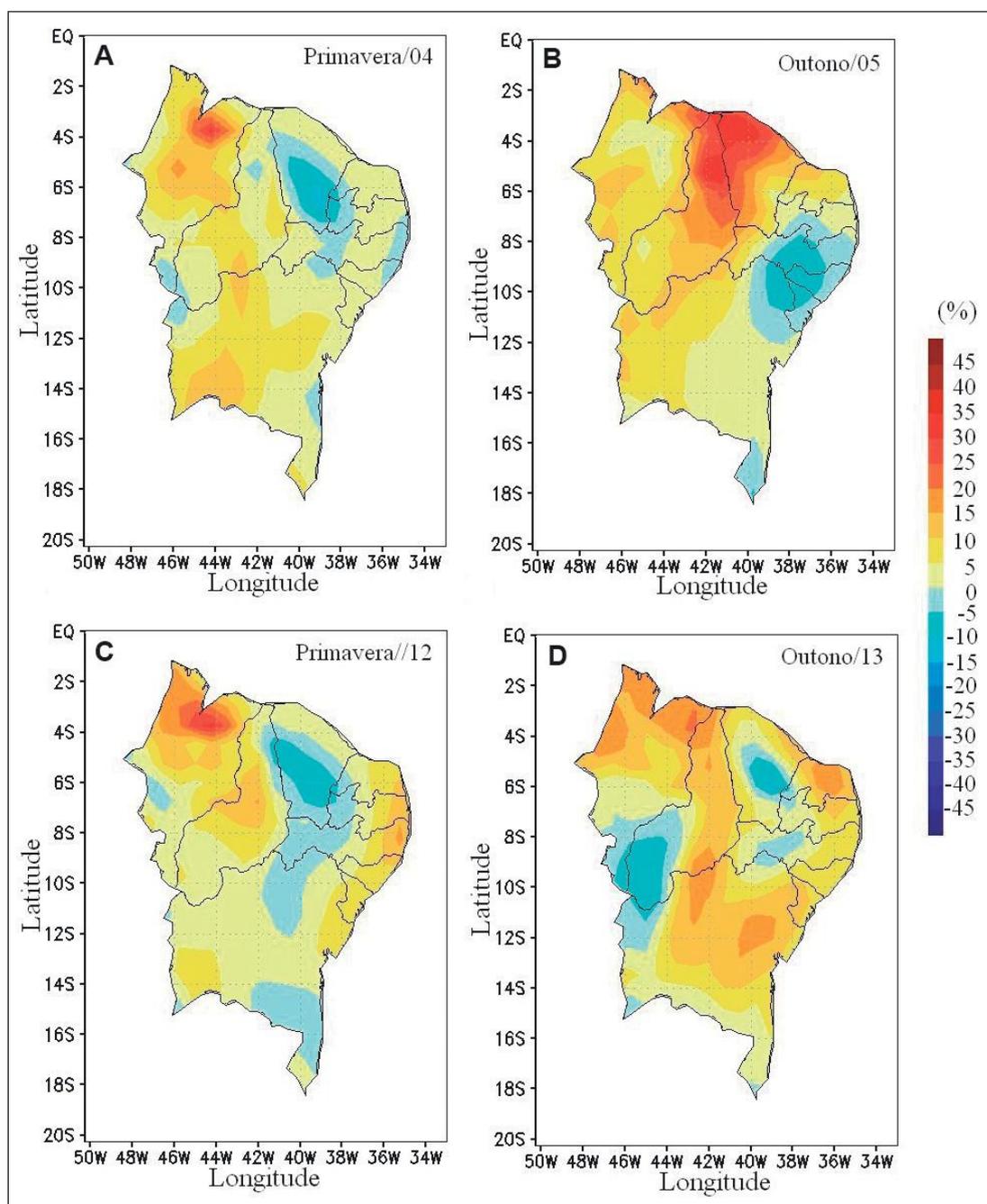
to forte) e 1993/1994 (eventos moderados) são mostrados na Figura 7 durante as primaveras de 1984 e 1993 (ATSM de  $-1,0^{\circ}\text{C}$  e  $-0,8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente) e outonos de 1985 e 1994 (ATSM de  $-0,6^{\circ}\text{C}$  e  $-0,7^{\circ}\text{C}$ , respectivamente). Observa-se que nesses casos prevalecem sobre a Região Nordeste do Brasil anomalias negativas da velocidade do vento, que atingem até 40% abaixo da média. A área atingida é de aproximadamente 80%. Destaca-se o outono de 1985 em

que as anomalias negativas do vento atingem intensamente os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. O mesmo ocorre para o outono de 1994, só que com intensidade menor.

De forma contrária, em episódios de Gradiente/Dipolo negativo prevalece sobre a Região Nordeste do Brasil um enfraquecimento dos ventos à superfície.

#### 4 Conclusões

Conforme os resultados apresentados para o comportamento do vento na Região Nordeste do Brasil são possíveis as seguintes conclusões: A média climatológica da velocidade do vento a 10 m da superfície apresenta uma variação sazonal com máximos de até 7,0 m/s na primavera austral caindo para até 5 m/s no outono; na estação da primavera



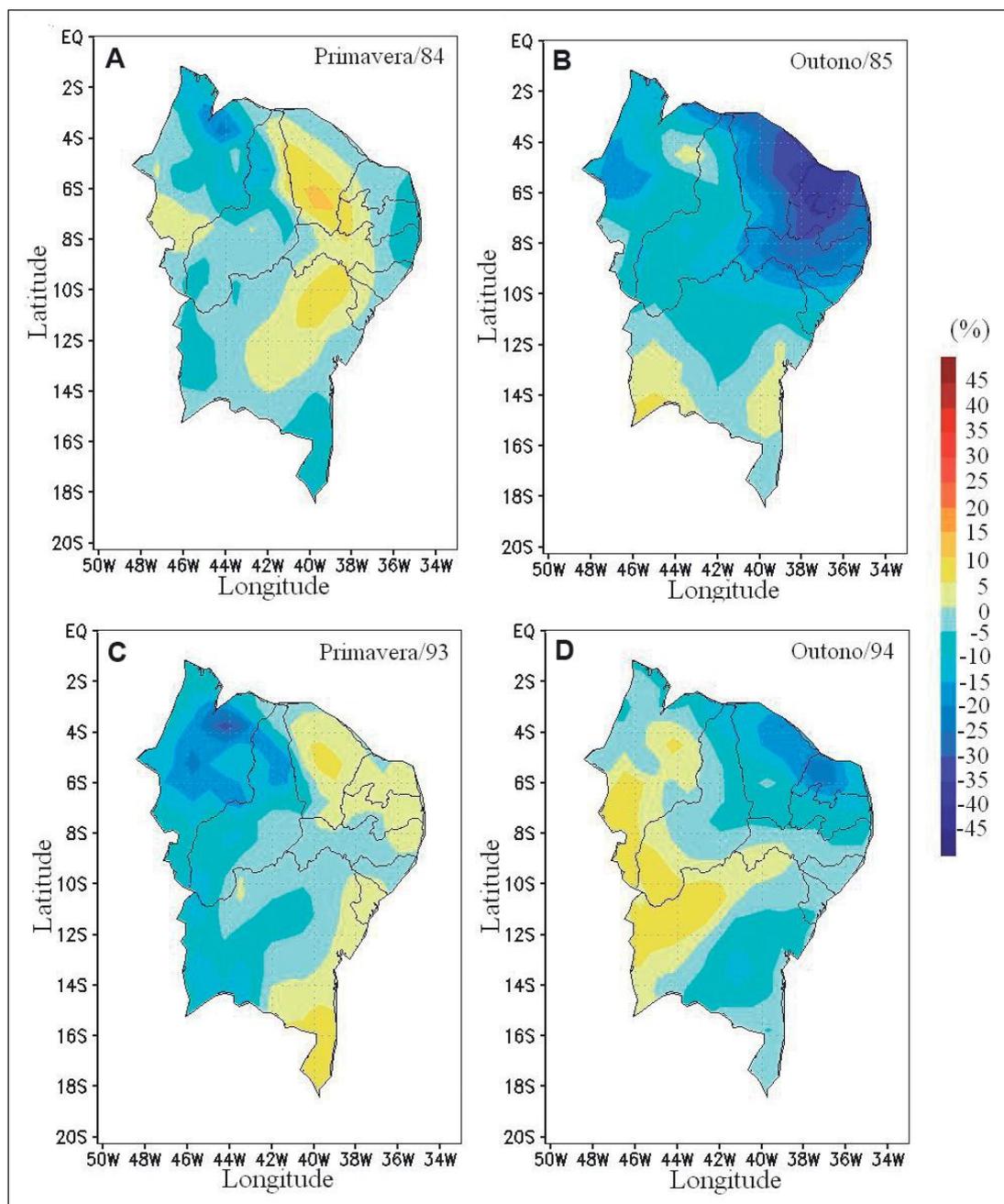


Figura 7 Distribuição espacial da anomalia do vento para anos de gradiente de anomalia negativo (D-) da TSM: A. primavera de 1984 forte; B. outono de 1985 moderado; C. primavera de 1993 moderado; D. outono de 1994 moderado.

ocorre uma expansão das áreas com velocidades superiores a 3,6 m/s em relação as outras estações do ano.

Durante os episódios de El Niño e La Niña conclui-se que: nos anos de eventos El Niño há uma predominância de anomalia positiva da velocidade do vento sobre a região, ou seja, ventos mais intensos até 45% acima da média no outono e 25% na primavera possibilitando maior produção de energia

elétrica. Já nos anos de La Niña, exceto para a primavera de 2007, essa predominância é de anomalias negativas do vento, significando ventos menos intensos de até 40% e 35% abaixo da média para o outono e primavera respectivamente, portanto, menor produção de energia elétrica pela fonte eólica.

Para evento de Gradiente/Dipolo positivo ocorre aumento da intensidade do vento de até 35% predominando sobre a maior parte da região favore-

cendo a geração de energia elétrica mediante a força do vento, enquanto que, nos eventos de Gradiente/Dipolo negativo ocorre uma diminuição da intensidade dos ventos de até 40% produzindo um efeito desfavorável na produção de energia elétrica pela fonte eólica.

Padrões de El Niño/La Niña e Dipolo positivo/negativo acarretam variabilidades interanuais importantes da velocidade do vento com impacto maior na estação austral do outono. Assim sendo, esse tipo de informação pode ser sistematicamente avaliada a medida em que se estabeleça um padrão oceânico de El Niño/La Niña e (ou) Dipolo, tornando-se de grande relevância no planejamento e monitoramento de geração de energia elétrica pela força do vento na Região Nordeste do Brasil.

## 5 Referências

- Alves, J.M.B.; Souza, E.B.; Repelli, C.A.; Vitorino, M.I. & Ferreira, N.S. 1997. Episódios de La Niña na bacia do Oceano Pacífico equatorial e a distribuição sazonal e intrasazonal das chuvas no setor norte do Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 12(1): 63-76.
- Amarante, O.A.C.; Brower, M.; Zack, J. & Sá, A.L. 2001. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Governo Federal, Brasília, 45 p. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf). Acesso em: 02 mar. 2020.
- ANEEL. 2018. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Relatório de acompanhamento da implantação de empreendimentos de geração*. 11: 23 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/655816/14483518/Relat%C3%B3rio+de+Acompanhamento+da+Implanta%C3%A7%C3%A3o+de+Empreendimentos+de+Gera%C3%A7%C3%A3o+N11+Mar%C3%A7o+2018/c74e72f2-cc88-3ea6-5608-d596a4a33154>. Acesso em: 02 mar. 2020.
- Bezerra, F.D. 2018. *Energia eólica gera riqueza no Nordeste*. Caderno Setorial. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE. 3(40): 20 p. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/documents/80223/3836533/40\\_eolica\\_2018.pdf/49ae96dd-c347-ced2-d3a1-f2555d4a8679](https://www.bnb.gov.br/documents/80223/3836533/40_eolica_2018.pdf/49ae96dd-c347-ced2-d3a1-f2555d4a8679). Acesso em: 02 mar. 2020.
- Bezerra, F.D. & Santos, L.S. 2017. *Potencialidades da energia eólica no Nordeste*. Caderno Setorial. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE. 2(5): 20 p. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/documents/80223/1910830/Eolica.pdf/9d7251e0-4c94-4570-b223-df7820b50d4d>. Acesso em: 02 mar. 2020.
- Camargo, A.S.G. 2005. *Análise da operação das usinas eólicas de Camelinho e Palmas e avaliação do potencial eólico de localidades no Paraná*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 206 p.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S. Andrae, U.; Balmaseda, M.A.; Balsamo, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; Van Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, L.; Kallberg, P.; Kohler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P. Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.J.; Park, B.K.; Peubey, C.; Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.N. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553-597.
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. *Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2018*. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS. Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2018/estimativa\\_dou\\_2018\\_20181019.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_dou_2018_20181019.pdf). Acesso em: 02 mar. 2020.
- Lima, F.J.L.; Cavalcanti, E.P.; Souza, E.P & Silva, E.M. 2012. Evaluation of the wind power in the State of Paraíba using the Mesoscale Atmospheric Model Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System. *ISRN Renewable Energy*, 16 p. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/847356/>. Acesso em: 02 mar. 2020.
- Lucena, J.A.Y. & Lucena, K.A.A. 2019. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line. *Clean Energy*, 3(2): 69-84.
- Marcuzzo, F.F.N. & Romero, V. 2013. Influência do El Niño e La Niña na precipitação máxima diária do Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(4): 429-440.
- Mariano, E.B. & Cavalcanti, E.P. 2017. Análise comparativa da velocidade do vento simulado pelo BRAMS com dados observados e de Reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2): 269-276.
- Mathiesen, B.V.; Lund, H. & Karlsson, K. 2011. 100% renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. *Applied Energy*, 88: 488-501.
- Moura, A.D. & Shukla, J. 1981. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *American Meteorological Society*, 38: 2653-2675.
- Nascimento, A.L.E.S; Lubanco, J.C. & Moreira, T.A. 2012. Fontes alternativas de energia elétrica: Potencial brasileiro economia e futuro. *Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, 2(1): 23-36.
- Oliveira, J.L. & Costa, A.A. 2011. Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o Nordeste Brasileiro utilizando o RAMS: Os casos de 1973-1974 e 1982-1983. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(1): 53-66.
- Patricola, C.M.; Saravanan, R. & Chang, P. 2014. The impact of the El Niño-Southern Oscillation and Atlantic Meridional Mode on Seasonal Atlantic Tropical Cyclone activity. *Journal of Climate*, 27(14): 5311-5327.
- Pereira, R.C.G. & Cavalcanti, E.P. 2014. Regimes pluviométricos da Região NE do Brasil: Uma análise dos dados

**Variabilidade da Velocidade do Vento e Influências Oceânicas:  
Uma Abordagem Para Fins de Geração de Energia Elétrica no Nordeste do Brasil**  
Enilson Palmeira Cavalcanti; Bernardo Barbosa da Silva; Vicente de Paulo Rodrigues da Silva & José Batista Chaves Filho

- climatológicos de 1961 a 1990 utilizando ACP. *Revista de Geografia (UFPE)*, 31(2): 248-258.
- Philander, S.G.H. 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. First Edition. Academic Press, 293 p.
- Rasmusson, E.M. & Carpenter, T.H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 110: 354-384.
- Ropelewski, C.F. & Halpert, M.S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115: 1606-1626.
- Ropelewski, C.F. & Halpert, M.S. 1989. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2: 268-284.
- Silva, B.B.; Alves, J.J.A.; Cavalcanti, E.P. & Dantas, R.T. 2002. Potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(3): 431-439.
- Silva, B.B.; Alves, J.J.A.; Cavalcanti, E.P. & Ventura, E.D. 2004. Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19: 189-202.
- Silva, G.R. 2003. *Características de vento da região Nordeste: Análise, modelagem e aplicações em projetos de centrais eólicas*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 131 p.
- Souza, E.B. 2003. *Variabilidade pluviométrica intrasazonal sobre a Amazônia Oriental e Nordeste Brasileiro durante o outono austral: Mecanismos atmosféricos de baixa e alta frequência*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 135 p.
- Strang, D.M.G. 1972. *Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste Brasileiro*. São José dos Campos CTA. (IAE-M-02/72), 70 p. Disponível por: Centro Técnico Aeroespacial, São José dos Campos, SP, Brasil.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12): 2771-2777.
- Trenberth, K.E. & Shea, D. 1987. On the evolution of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115: 3078-3096.