

## Caracterização do regime de ventos e avaliação do potencial eólico nas torres anemométricas da rede SONDA

<sup>1</sup> Wellington Winícius Ferreira Fonseca

<sup>1</sup> Fernando Ramos Martins

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP/IMar  
Caixa Postal 11070-100 – Santos – SP, Brasil  
w.ferreira.fonseca@gmail.com

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP/IMar  
Caixa Postal 11070-100 – Santos – SP, Brasil  
fernando.martins@unifesp.br

### Abstract

The present study aimed to develop an anemometric data qualification algorithm and characterize the annual and seasonal wind resource patterns for data acquisition sites located in Brazil. Anemometric data has been collected through the SONDA measurement site located at the São Martinho da Serra, central region of Rio Grande do Sul, and Petrolina, inner region of Pernambuco. The time series covers the period from 2007 to 2016. The qualification script was developed using MATLAB based on climatological data and WMO criteria. The annual wind resource patterns presented low seasonal and interannual variability in both measurement sites. Weibull distribution provided reliable values for shape (k) and scale (c) factors. The result showed that Petrolina presented good wind climate for electricity generation.

**Palavras-chave:** wind energy; wind statistical distribution; remote sensing; energia eólica; distribuição estatística dos ventos; sensoriamento remoto.

## 1. INTRODUÇÃO

A questão energética é um tópico bastante relevante no momento atual em razão da sua relação intrínseca com a qualidade de vida da sociedade, com a infraestrutura necessária para dar suporte ao desenvolvimento socioeconômico do país e, finalmente, com a questão ambiental associada à variabilidade climática e emissão de poluente atmosféricos (Goldemberg e Lucon, 2007). Nas últimas décadas deu-se início a um esforço mundial para aumentar a implementação de fontes renováveis de energia. Estimativas apontam para um possível cenário em que as fontes renováveis irão equiparar-se a utilização de combustíveis fósseis para atendimento da demanda energética em 2040 (EREC, 2004).

A utilização da energia cinética dos ventos é utilizada há milhares de anos pela humanidade. No entanto, foi em meados da década de 1980, na Dinamarca, o ponto de partida para o desenvolvimento tecnológico aplicado ao aproveitamento do recurso eólico para geração elétrica. As primeiras turbinas apresentavam capacidade geradora reduzida se comparadas com as atuais. Uma turbina onshore moderna comum apresenta uma capacidade entre 2,5 MW e 3 MW, porém as maiores turbinas do mercado possuem capacidade de aproximadamente 7,5 MW (EWEA, 2012). Com investimentos em pesquisa e engenharia, a tendência é o crescimento da instalação de parques eólicos em todo o globo. Uma característica vantajosa da energia eólica é a redução temporal do custo em função do desenvolvimento tecnológico (Viterbo, J.C., 2008). Outro fator importante é a queda do custo da energia gerada em função das velocidades médias dos ventos no local de instalação dos aerogeradores (Wind Power Monthly, 2004), configurando uma situação interessante principalmente no Nordeste brasileiro.

A matriz energética brasileira conta com cerca de 41,2% de energia produzida a partir de fontes renováveis, como demonstrou o mais recente relatório do Ministério de Minas e Energia. No entanto, ainda há forte concentração da geração hidráulica, responsável por 64% da oferta interna de energia elétrica. A fins comparativos, 3,5% foi a participação da energia eólica e 0,01% a da energia solar, ao final de 2015 (MME, 2016). Segundo o BIG/ANEEL, com dados atualizados em novembro deste ano, houve um aumento da capacidade instalada no setor eólico, que atingiu 6,51% de participação na matriz elétrica. Esses valores reforçam o justificado interesse do governo brasileiro em investir em energia eólica. Além disso, a concentração da fonte hidroelétrica vem contribuindo com o aumento da vulnerabilidade do sistema elétrico nacional, sob o ponto de vista de segurança energética em razão de longos períodos de estiagem que vem ocorrendo com uma maior frequência recentemente.

O governo brasileiro vem adotando políticas de incentivo à diversificação da matriz com fontes renováveis desde 2002. O PROINFA foi o principal programa de incentivo na última década e resultou no crescimento do aproveitamento do recurso da energia dos ventos disponível principalmente no Nordeste brasileiro onde os períodos de estiagem afetam de forma importante os reservatórios das usinas hidroelétricas (Martins e Pereira, 2011). O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro estimou o potencial eólico de 143GW no Brasil (Amarante et al., 2001). No entanto, este valor encontra-se defasado, pois estima o potencial considerando os ventos a 50m acima do solo, enquanto os aerogeradores modernos operam a 80m. Estudos avaliam que o potencial estimado pode atingir valores na ordem de 300GW (Simas e Pacca, 2013). As maiores velocidades médias são observadas principalmente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul. Isto configura como uma vantagem para a transmissão elétrica dada a maior densidade de linhas de transmissão e da malha viária nessas regiões, o que repercute favoravelmente no custo dos projetos eólicos.

O crescimento de energia eólica ajudará o país a cumprir os objetivos estratégicos de reforçar a segurança energética nacional sem a necessidade de crescimento significativo das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, o aproveitamento do recurso eólico requer um conhecimento detalhado de variabilidade espaço-temporal da velocidade e direção do vento. O vento está fortemente relacionado com as condições de tempo e clima em escalas regional e local. A previsão de potência eólica disponível está intimamente relacionada ao conhecimento detalhado do regime de vento no local de interesse que envolve a coleta e análise cuidadosa dos dados de vento observados em diferentes alturas acima da superfície em uma torre anemométrica. A confiabilidade das informações é essencial para o desenvolvimento e avaliação da viabilidade econômica de uma planta eólica.

No Brasil, a rede SONDA é a principal rede pública de coleta de dados meteorológicos com a finalidade de aprimorar os modelos numéricos utilizados na estimativa do potencial eólico nacional. A rede SONDA é operada e administrada pelo Laboratório de Estudos de Energias Renováveis instalado no Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE).

O foco principal deste trabalho é o estudo de caracterização e variabilidade do regime ventos nas torres anemométricas da rede SONDA instaladas em São Marinho da Serra/RS e Petrolina/PE. Além disso, em virtude da importância da qualidade dos dados de vento e da extensão da base de dados coletados, faz-se necessário o desenvolvimento de um script de qualificação automatizada.

## **2. Metodologia de trabalho**

### **2.1. Estações anemométricas**

Para o desenvolvimento do presente estudo foram utilizados dados anemométricos coletados de 2007 até 2016 em duas estações da rede SONDA: a estação de São Martinho da Serra (SMS), localizada na

região central do Rio Grande do Sul, e a estação de Petrolina (PTR), localizada no interior de Pernambuco. Os dados observados foram cedidos pelo INPE e, como contrapartida, a base de dados qualificada será repassada ao INPE para disponibilização pública. Tanto a região Sul quanto a região Nordeste do território brasileiro apresentam um potencial eólico acima da média nacional, conforme apontam as informações do Atlas Brasileiro do Potencial Eólico.

Além dos dados de vento (velocidade e direção) as torres também possuem sensores para coleta de dados de temperatura nas mesmas alturas de coleta de dados de vento e sensores de pressão, umidade relativa e precipitação instaladas na superfície.

Cada torre anemométrica possui três anemômetros modelo 05106 (R. M. Young Co.) instalados em 10, 25 e 50 metros de altura acima do solo. Um barômetro Vaisala PTB101 e dois sensores de temperatura do ar modelo 41342 estão instalados nas alturas de 25 e 50m. Além disso, um sensor de temperatura/umidade do ar modelo 41372 (R. M. Young Co.) e um pluviômetro (Sutron modelo 5600-040L) estão instalados no solo. As estações coletaram dados de vento à 25 e 50m em intervalos de 10 minutos durante todo o período analisado.

Considerando o impacto da velocidade do vento na disponibilidade de energia eólica (eq. 1), é essencial manter um controle criterioso da qualidade da base de dados observados em campo. A Organização Mundial de Meteorologia (WMO – sigla do nome original em inglês – World Meteorological Organization) estabelece os critérios de qualidade a serem utilizados com o intuito de assegurar a confiabilidade dos dados. As prováveis causas de erro na aquisição de dados de vento estão associadas a ocorrência de descargas elétricas e ruídos eletrônicos devido a problemas de conexão dos cabos entre os sensores e o data logger que armazena temporariamente os dados observados. Considerando que a coleta de dados foi feita através de estações automáticas, a primeira etapa do projeto foi a avaliação da qualidade dos dados coletados e armazenados na base de dados do INPE.

## 2.2. Qualificação dos dados

A Tabela 1 apresenta os critérios de qualificação adotados no desenvolvimento do script para este estudo, estabelecidos pela rede SONDA. Nesta etapa foi desenvolvido um script numérico para automatizar a qualificação dos dados observados. O script foi elaborado utilizando o pacote MATLAB disponibilizado pelo orientador da pesquisa com licença adquirida em projeto de pesquisa financiado pelo CNPq.

Tabela 1. Critérios utilizados para qualificação de dados observados na rede SONDA.

Algoritmo 1	Algoritmo 2	Algoritmo 3	Algoritmo 4
<b>Temperatura (°C)</b>			
Valor Mínimo e Máximo estabelecidos com base em climatologia local.	Variação < 5°C em um período de 1 hora	Variação < 5°C em um período de 12 horas	Não Aplicado
<b>Velocidade (m/s)</b>			
Min. 0 Max. 25	Variação > 0,1 m/s em um período de 3h horas	Variação > 0,5 m/s em um período de 12 horas	Sensor mais alto > sensor no mesmo momento.
<b>Direção (graus)</b>			
Min.: 0° Max.: 360°	Variação > 1° em um período de 3 horas	Variação > 10° em um período de 18 horas	Não Aplicado

Dado o intervalo entre as medições (6 medições/hora x número de horas), 52.560 medições foram realizadas ao ano. Para qualificação desta imensa base de dados observados, foram utilizados algoritmos distintos para cada variável meteorológica observada, fazendo uso, porém, da mesma lógica. A Figura 1 ilustra a esquematização da lógica utilizada no script numérico para qualificação.

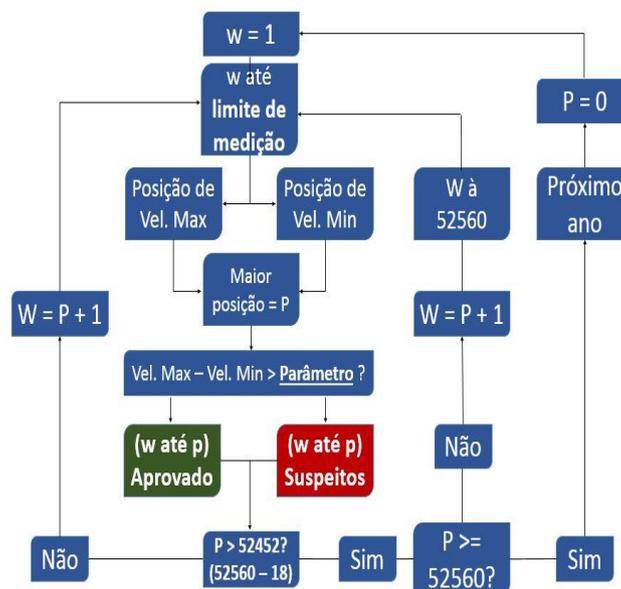


Figura 1. Lógica utilizada no script de qualificação dos dados observados nas duas estações da rede SONDA. W é o número de observações por ano. P é o número de observações no intervalo de tempo analisado nos algoritmos 2 e 3 descritos anteriormente.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Base de dados qualificados

Na primeira etapa deste estudo foi realizado a qualificação dos dados observados com o intuito de garantir as informações utilizadas na caracterização do regime de ventos observados nos locais das duas torres anemométricas da rede SONDA.

Tabela 2. Quantidade de dados que atenderam plenamente os critérios de qualidade da rede SONDA.

h (m)	Estação	São Martinho da Serra (%)			Petrolina (%)		
		Velocidade	Direção	Temperatura	Velocidade	Direção	Temperatura
25	Verão	59,44	82,36	85,56	82,22	84,53	84,32
	Outono	79,74	98,48	97,93	84,67	87,03	86,70
	Inverno	75,35	97,77	96,91	87,38	87,54	87,52
	Primavera	64,44	85,75	85,4	89,44	90,06	89,95
50	Verão	59,44	86,2	83,87	82,30	85,53	84,34
	Outono	79,44	98,48	90,86	84,76	87,03	86,73
	Inverno	75,35	97,77	83,35	87,37	87,53	87,52
	Primavera	64,44	85,76	85,52	89,45	90,05	89,96

Os dados identificados como suspeitos não foram descartados, mas sinalizados para permitir ao usuário decidir se e como irá utilizá-los. Foi adicionada à base de dados uma sinalização de qualidade, demonstrando a aprovação do dado ou, caso contrário, em que etapas ocorreu o não atendimento dos critérios de qualificação estabelecidos. A estação de São Martinho da Serra apresentou baixos índices de qualidade para as variáveis de velocidade dos ventos, se comparado aos dados obtidos pela estação de Petrolina, como demonstra a Tabela 2, abaixo.

### 3.2. Distribuição estatística dos dados de vento

A distribuição estatística dos dados de vento é caracterizada neste estudo pela rosa dos ventos juntamente do histograma ajustado pela distribuição de Weibull. A rosa dos ventos relaciona dados de direção, velocidade e frequência relativa. A seguir são apresentados comparativos das rosas dos ventos dos dados raw e validados para SMS e PTR a 25m e 50m de altura.

A Figura 2 apresenta a rosa dos ventos para os 4 períodos sazonais do ano. À esquerda está indicado as quatro distribuições para velocidade e direção do vento a 25 m acima da superfície na estação de São Martinho da Serra. À direita está as quatro distribuições para velocidade e direção do vento a 50 m acima da superfície na estação de São Martinho da Serra.

A Tabela 3 demonstra os valores de velocidade média ( $u$ ), juntamente dos parâmetros de forma ( $k$ ) e escala ( $c$ ) a 25 e 50m para ambas as estações. A estação de SMS apresentou parâmetro de forma ( $k$ ) da distribuição de Weibull na ordem de 1,5, valores não considerados adequados para o aproveitamento do recurso eólico na geração de eletricidade.

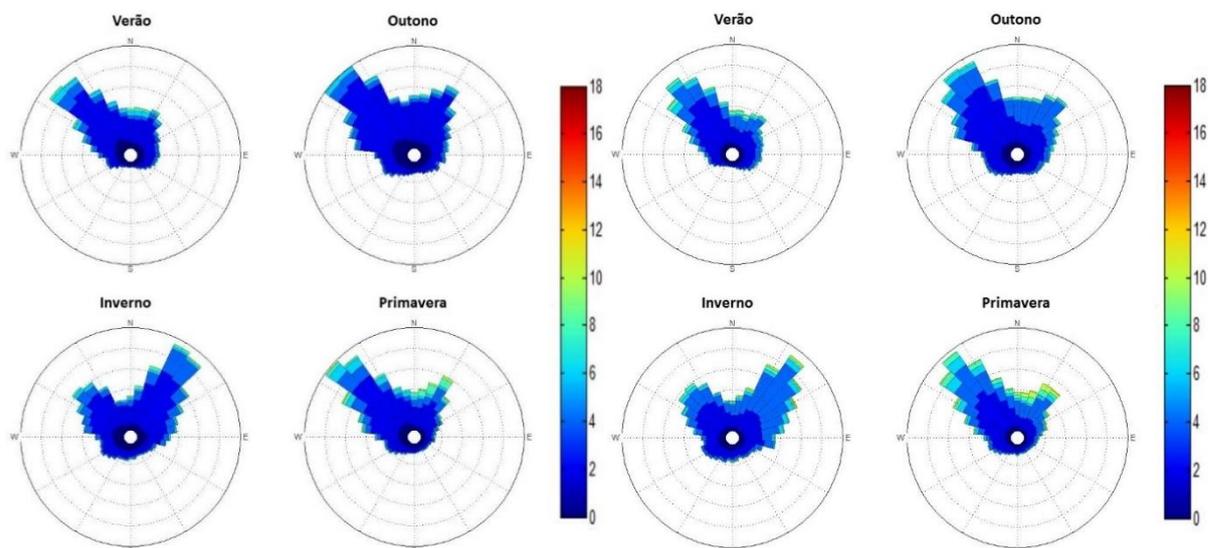


Figura 2. (a) Rosa dos ventos dos dados observados a 25m na estação de SMS. (b) Rosa dos ventos dos dados observados a 50m na estação de SMS.

As maiores médias de velocidade foram observadas ao longo do período de inverno. Durante o Verão, Outono e Primavera há predominância de ventos sentido Noroeste e, em menor frequência, sentido Nordeste. No inverno, o padrão observado é oposto, com predominância de ventos sentido Nordeste e, em menor frequência, sentido Noroeste.

Tabela 3. Distribuição estatística dos dados de vento nas estações anemométricas da rede SONDA.

h (m)	Estação	São Martinho da Serra (%)			Petrolina (%)		
		u	c	k	u	c	k
25	Verão	3,165	2,589	1,433	3,492	2,922	1,985
	Outono	2,89	2,301	1,34	3,316	2,099	2,725
	Inverno	3,2	2,699	1,555	4,197	3,608	2,647
	Primavera	3,59	3,092	1,531	4,3	3,784	2,519
50	Verão	3,74	3,227	1,39	4,55	4,066	2,081
	Outono	3,46	2,99	1,556	4,414	3,894	2,215
	Inverno	3,85	3,389	1,387	5,538	5,092	3,224
	Primavera	4,2	3,781	1,513	5,53	5,154	2,744

A Figura 3 é análoga à Figura 2, desta vez representando as rosas dos ventos para a estação de Petrolina. Como esperado com base do Atlas Brasileiro de Energia Eólica, a estação de PTR apresentou maiores médias de velocidade que a estação de SMS em função de sua localização no Nordeste. Os dados de vento coletados nesta torre anemométrica apresentaram índice de aprovação elevado – maior que 80% dos dados coletados. Localizada no Nordeste Brasileiro, Petrolina está sob influência dos ventos alísios, apresentando maiores médias de velocidade e direção bem definida com predominância de ventos sentido Noroeste durante todas as estações do ano.

A Figura 5 apresenta o histograma de velocidade de vento a 25m e 50m e o ajuste da distribuição de Weibull (linha contínua) para SMS. A Figura 6 apresenta o histograma de velocidade de vento e ajuste da distribuição de Weibull para os dados observados em PTR. O baixo valor de parâmetro de forma (k) obtido para a estação de SMS é devido a maior frequência relativa para baixas velocidades de vento. Valores inferiores a 1,6 foram observados ao longo de todas as estações do ano para os dados de vento coletados tanto em 25m quanto em 50m acima da superfície. Valores dessa ordem de grandeza não são adequados para uso de recurso eólico na geração de eletricidade (Grah et. al, 2014).

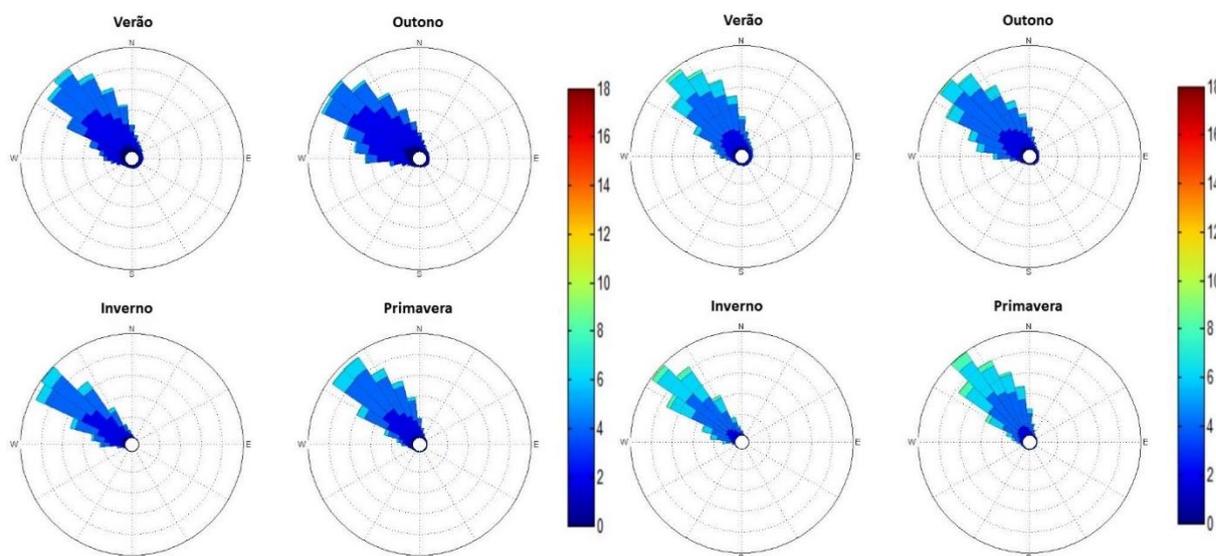


Figura 3. (a) Rosa dos ventos dos dados observados a 25 m na estação de PTR. (b) Rosa dos ventos dos dados observados a 50 m na estação de PTR.

Como é possível perceber nas Figuras 4 e 5, a estação de PTR apresenta curvas de distribuição estatística de Weibull com fatores de forma bastante superiores aos observados em SMS, principalmente a 50m de altura. As velocidades mais frequentes também são superiores às observadas em SMS o que resulta em fatores de escala entre 3,5 e 5 para as alturas de 25 m e 50 m, respectivamente.

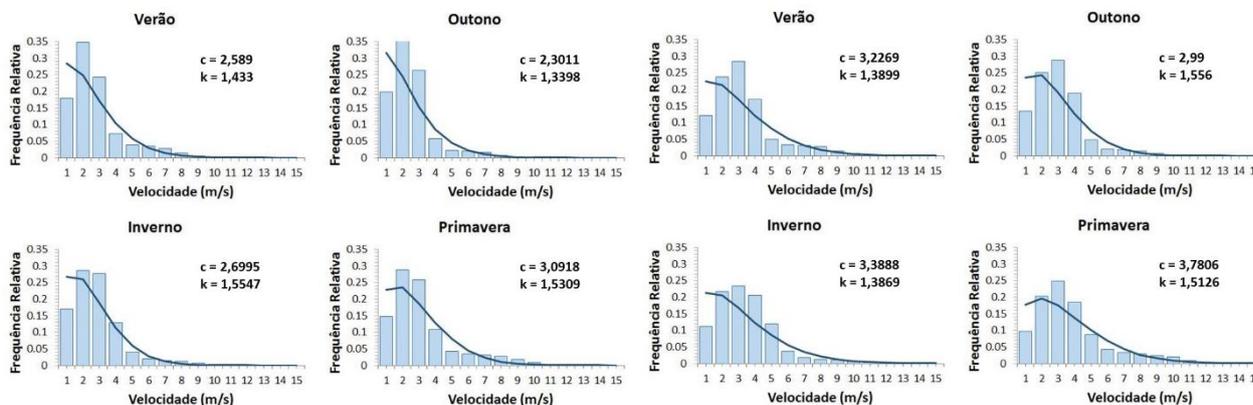


Figura 4. (a) Histograma de velocidade dos ventos 25 m ajustado com a distribuição de Weibull na estação de SMS. (b) Histograma de velocidade dos ventos 50 m ajustado com a distribuição de Weibull na estação de SMS.

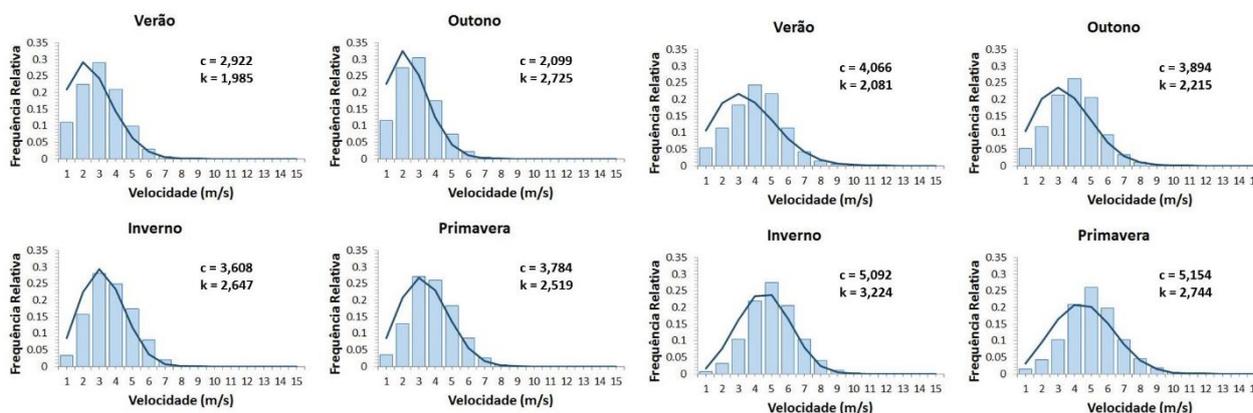


Figura 5. (a) Histograma de velocidade dos ventos 25 m ajustado com a distribuição de Weibull na estação de PTR. (b) Histograma de velocidade dos ventos 50 m ajustado com a distribuição de Weibull na estação de PTR.

#### 4. Conclusões

Este trabalho buscou estudar a disponibilidade e variabilidade do recurso de energia eólica nas torres anemométricas da rede SONDA instaladas em São Marinho da Serra/RS e Petrolina/PE. A base de dados utilizada compreende o período entre 2007 e 2016. É importante ressaltar que é preciso uma base de dados de ao menos 30 anos para definir a climatologia dos ventos nas localidades estudadas. Porém, pouco mais de 9 anos de série de dados permite compreender as características importantes do regime de ventos e fornece uma visão abrangente da variabilidade intersazonal e interanual do regime de ventos.

A Estação de São Martinho da Serra não apresentou uma distribuição estatística de Weibull que indique viabilidade de aproveitamento do recurso eólico para a geração de eletricidade, devido à alta

frequência relativa para baixar velocidades de vento e o baixo fator de forma ( $k$ ) da distribuição. Durante as estações de verão, outono e primavera houve predominância de ventos de noroeste (NO) para sudeste (SE) e, em menor frequência, de ventos de nordeste (NE) para sudoeste (SO). Já no inverno o padrão foi o oposto, com predominância de ventos NE para SO e, em menor frequência, ventos de NO para SE.

Por sua vez, a estação de Petrolina valores superiores dos parâmetros de escala e de forma da distribuição estatística de Weibull, principalmente para os dados de vento a 50m de altura. A estação apresentou um regime de vento bem definido durante o ano inteiro, havendo predominância de ventos sentido Noroeste, devido aos ventos alísios.

A estação de inverno apresentou as maiores velocidades médias, em 25 e 50m, para as duas estações anemométricas, sendo 4,2 m/s para São Martinho da Serra e 5,83 m/s para Petrolina.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa PIBIC/CNPq pelo financiamento deste estudo e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização integral da base de dados da rede SONDA.

## 6. Referências bibliográficas

- GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estud. Av. São Paulo*, v. 21, n. 59, p. 7-20, Apr. 2007.
- EREC, 2004. European Renewable Energy Council. Renewable Energy Scenario to 2040. pág.11.
- EWEA, 2012. European Wind Energy Association. Disponível em <http://www.ewea.org/>.
- VITERBO, J. C., 2008. Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo.
- Wind Power Monthly. Becoming Respectable in Serious Circles. *Wind Power Monthly*, vol. 20, Jan. 2004.
- MME, 2016. Ministério de Minas e Energia. *Resenha Energética Brasileira*, Ed. 2016.
- BIG/ANEEL. Banco de Informações de Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing Information For Solar and Wind Energy Technology Deployment in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n.7, p. 4378-4390, 2011.
- AMARANTE, O. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L., 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro,
- SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Estud. av.*, São Paulo, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013.
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., Pereira, E. B., 2008. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.30, n.1, 1304.
- R.B. Stull, An introduction to Boundary Layer Meteorology (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988).
- J.C. Kaimal and J.J. Finnigan, Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement (Oxford University Press, New York, 1994).
- GRAH, Vanessa de F.; PONCIANO, Isaac de M.; BOTREL, Tarlei A. Potential for wind energy generation in Piracicaba, SP, Brazil. *Rev. bras. eng. agric. ambient.* Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 559-564, May, 201