

# VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE EM AMBIENTE URBANO: VALIDAÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS

**Leidylaine Cardoso das Neves** (IFES) - leidylainecardosodasneves@gmail.com

**Matheus Silva Aguiar** (IFES) - matheussa1996@gmail.com

**Arthur Monteiro Filho** (IFES) - arthurmtfilho@gmail.com

**Elias Rocha Gonçalves Júnior** (IFES) - elias.junior@ifes.edu.br

**Ramon Silva Martins** (Ifes) - ramonsmartins@gmail.com

## **Resumo:**

*Este artigo apresenta um método de validação dos dados de recursos eólicos e uma estimativa anual do potencial eólico da cidade de Vitória - ES. Tem por objetivo principal a análise de confiabilidade dos dados de velocidade e direção dos ventos, para o estudo da viabilidade de instalação de turbinas eólicas de pequeno porte em ambiente urbano. Os dados utilizados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para uma altitude de 9m, e os critérios para a validação dos dados foram baseados no livro Wind Resource Assessment Handbook: Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program, em que os dados caracterizados como "fisicamente possíveis" recebem o dígito 9, e os dados caracterizados como "extremamente raros ou suspeitos" recebem o dígito 2. O presente artigo utiliza a distribuição de probabilidade de Weibull, para a análise da velocidade dos ventos, e a rosa dos ventos para verificação da melhor direção para onde a turbina ficará direcionada. A validação visa diminuir erros que podem estar presentes nos dados fornecidos, e será utilizado como um parâmetro de verificação dos dados que não possuem algum tratamento.*

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Distribuição de Weibull, Validação de dados

**Área temática:** Outras fontes renováveis de energia

**Subárea temática:** Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade

# VIABILIDADE DE INSTALAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE EM AMBIENTE URBANO: VALIDAÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS

**Leidylaine Cardoso das Neves** – leidylainecardosodasneves@gmail.com

**Matheus Silva Aguiar** – matheussa1996@gmail.com

**Arthur Monteiro Filho** – arthurmtfilho@gmail.com

**Elias Rocha Gonçalves Júnior** – elias.junior@ifes.edu.br

**Ramon Silva Martins** – ramon.martins@ifes.edu.br

Coordenadoria de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória-ES

**Resumo.** Este artigo apresenta um método de validação dos dados de recursos eólicos e uma estimativa anual do potencial eólico da cidade de Vitória – ES. Tem por objetivo principal a análise de confiabilidade dos dados de velocidade e direção dos ventos, para o estudo da viabilidade de instalação de turbinas eólicas de pequeno porte em ambiente urbano. Os dados utilizados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para uma altitude de 9m, e os critérios para a validação dos dados foram baseados no livro *Wind Resource Assessment Handbook: Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program*, em que os dados caracterizados como “fisicamente possíveis” recebem o dígito 9, e os dados caracterizados como “extremamente raros ou suspeitos” recebem o dígito 2. O presente artigo utiliza a distribuição de probabilidade de Weibull, para a análise da velocidade dos ventos, e a rosa dos ventos para verificação da melhor direção para onde a turbina ficará direcionada. A validação visa diminuir erros que podem estar presentes nos dados fornecidos, e será utilizado como um parâmetro de verificação dos dados que não possuem algum tratamento.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Distribuição de Weibull, Validação de dados.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia é algo imprescindível para a vida humana. Esse é um assunto em alta há algum tempo, e mais ainda nos últimos anos devido à alta demanda energética mundial, demanda essa que cresce junto com o aumento populacional. A gestão energética é fundamental em qualquer sociedade estruturada, pois é a essência da execução de uma escala de operação que vai desde funções rudimentares da agricultura até as mais avançadas da indústria espacial. Com tal cenário se faz necessário o estudo e a utilização cada vez maior de fontes variadas de geração de energia.

Nos últimos anos, em virtude das várias crises energéticas ocorridas na história e do impacto ambiental causado pelo uso de combustíveis fósseis, o perfil da produção energética tem mudado bastante, aumentando assim a importância do uso de fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica e biomassa.

Em 2014, a capacidade total de energia oriunda de fontes renováveis era de 712 GW, das quais 370 GW eram de aerogeradores (REN21, 2015). No final de 2015, a capacidade total de energia eólica chegou a 432 GW, apresentando um aumento de 17%. Muito embora os parques eólicos sejam a opção padrão em termos de geração em larga escala, há ainda alguns problemas relacionados à sustentabilidade nessa opção. Por exemplo, há a questão do espaço para o parque, da aceitação pública, e das perdas na transmissão e na transmissão da eletricidade até o consumidor (Musial, 2010). Uma alternativa no sentido de reduzir algumas dessas questões é o uso de turbinas eólicas de pequeno porte. No final de 2014, a capacidade de energia total vinda de turbinas eólicas de pequeno porte somava 830 MW, representando um aumento de 10,9% em relação a 2013 (WWEA, 2017).

No Brasil, apesar do crescimento da utilização da energia eólica, ainda existe espaço para ampliação. No desenvolvimento de projetos que visam à instalação de aerogeradores, faz-se necessário o conhecimento do potencial eólico da região. Estes dados são fornecidos por estações meteorológicas como o as do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), porém são suscetíveis a erros de registros devido à qualidade da instalação e da manutenção dos equipamentos. Por este motivo, carecem de verificação por meio de um tratamento de dados.

Assim, com o intuito de determinar o potencial eólico da cidade de Vitória-ES para a instalação de turbinas eólicas de pequeno porte, o presente artigo visa a contribuir para o desenvolvimento de projetos com base em dados confiáveis. Exibindo a caracterização dos perfis de direção dos ventos anuais da região, bem como a de distribuição de velocidades, e com isso propiciar uma solução para estudos posteriores sobre a efetividade da instalação dessas turbinas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

## 2.1 Dados

Os dados utilizados para este artigo foram fornecidos pelo INMET. O INMET, é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, cuja missão é fornecer à sociedade brasileira e contribuir construtivamente para o processo de tomada de decisão, auxiliando no desenvolvimento sustentável do País.

As informações presentes nos dados referem-se à cidade de Vitória-ES, cuja localização está apresentada na Fig. 1, estando situada geograficamente em latitude  $20^{\circ}19'15''$  S e longitude  $40^{\circ}20'10''$  W, a 3 m acima do nível do mar (Vitória em Mapas, 2019). Segundo a classificação climática Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), a cidade tem uma climatologia Aw (equatorial de inverno seco), com temperatura média anual em torno de  $24,8^{\circ}\text{C}$ . Em 2019, a população era de 362.097 habitantes e a área é de  $97,123\text{ km}^2$  (IBGE, 2019). Já a estação meteorológica do INMET mais próxima do local de estudo, está localizada especificamente na latitude  $20^{\circ}16'$  S e longitude  $40^{\circ}18'$  W, sendo todos os dados referentes a uma altura de 9 m (Sobre o INMET, 2019).

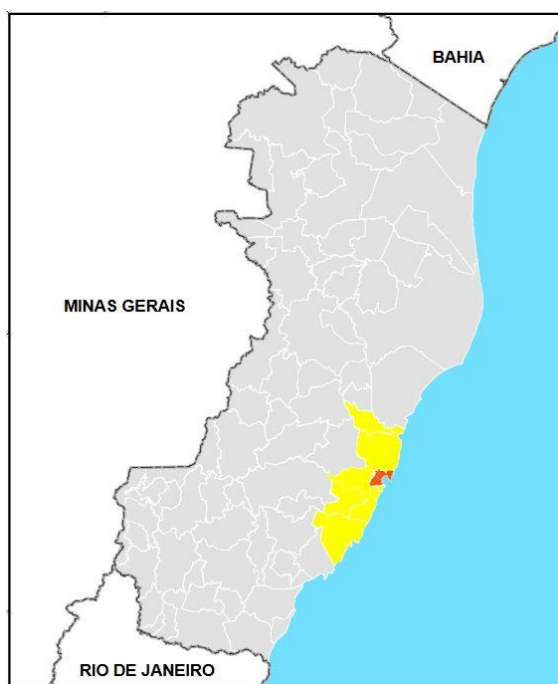


Figura 1 – Localização de Vitória (em vermelho).

Os dados fornecidos pelo INMET tratam de informações dos anos 2006 a 2019. Nesse trabalho, usam-se dados do ano 2016 em diante, devido a uma melhor aferição dos equipamentos utilizados, o que permitiu que este período obtivesse mais resultados que seriam utilizados para a análise.

## 2.2 Validação dos dados

Para a certificação de confiabilidade dos dados fornecidos dos instrumentos utilizados pela estação do INMET, necessita-se um tratamento que indica o quão fisicamente possíveis seriam estes dados. Esta validação é baseada em Wind Resource Assessment Handbook: Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program. (April 1997). Sua vantagem é que, para um tratamento feito inicialmente sem qualquer parâmetro como base, ele fornece informações que podem ser utilizadas para qualquer tratamento.

A Tab. 1 fornece os parâmetros utilizados para classificação dos dados referentes à velocidade dos ventos.

Tabela 1 – Critérios utilizados para a validação dos dados.

VELOCIDADE DOS VENTOS: HORIZONTAL	CRITÉRIO DE VALIDAÇÃO
Média (3 em 3h)	Offset < Média < 25,0 m/s
Desvio Padrão (3 em 3h)	$0 < \text{Desvio Padrão} < 3,0\text{ m/s}$
Rajada Máxima	Offset < Rajada Máxima < 30,0 m/s

Ao classificar a média, o desvio padrão e a rajada máxima, o dado correspondente ao horário do dia recebia o dígito 9 ou 2, para fisicamente possível ou extremamente raros e/ou suspeitos, respectivamente. Os dados possuíam, portanto, 3 dígitos, que poderiam ser apresentados ao final da análise sob 8 formas diferentes: 999, 992, 929, 922, 299, 292, 229 ou 222. Ao final, o dia que apresentasse algum dado com o dígito 2 em qualquer posição era descartado,

evitando possíveis conflitos que pudessem ser causados pela retirada de horas em que a medição foi duvidosa e que fizesse a média daquele dia diminuir. Outro conflito que pode existir, é a apresentação de dados problemáticos referentes a algum defeito ou impedimento do aparelho que aparecem na forma NULL. Ao dispô-los em um software, eles podem apresentarem-se sob a forma NaN (Not a Number), o que pode também levar a erros na apresentação dos resultados.

Para o cálculo das médias das velocidades dos ventos, foi utilizada a Eq. (1), com unidade em m/s.

$$\bar{v} = \frac{\sum_i^n v_i}{n} \quad (1)$$

Onde  $\bar{v}$  é a média da velocidade para uma determinada faixa de horas,  $v_i$  a velocidade na hora específica e  $n$  a quantidade total de horas.

Já para o cálculo dos desvios padrões  $s$ , foi utilizada a Eq. (2) para um desvio padrão amostral, em que apenas uma parcela dos dados foi calculada (2016 a 2019), sendo adimensional.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (v_i - \bar{v})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

### 2.3 Software utilizado

O cálculo das médias e desvios padrões, a atribuições de valores para a validação dos dados e a apresentação dos resultados em formato gráfico, foram auxiliados pelo software MATLAB. Ele possui ferramentas que contribuem enormemente para a análise estatística dos dados. Como inicialmente os dados foram fornecidos em formato de planilha, com o auxílio do MATLAB, um algoritmo montado acelerou o cálculo dos dados, o que otimizou o tempo de trabalho e colaborou para uma melhor análise dos resultados apresentados.

### 2.4 Tratamento estatístico

Tratando-se do estudo do potencial eólico de uma região, a análise estatística principal, utilizada para a verificação da ocorrência das velocidades dos ventos, é a densidade de probabilidade de Weibull. Segundo Pinto (2013), foi descrita pela primeira vez por Ernest Hjalmar Walodî Weibull (1887 – 1979) em 1939 como um modelo para o planejamento estatístico sobre fadiga do material. Devido à sua grande aplicação na teoria e engenharia de confiabilidade, seu modelo descreve de forma clara e coerente, para este acaso, a distribuição das velocidades dos ventos.

O modelo é apresentado pela Eq. (3), em que  $v$  é a velocidade dos ventos (m/s),  $k$  é o fator de forma adimensional e  $c$  o fator de escala (m/s).

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{k-1}e^{-(v/c)^k} \quad (3)$$

O fator de forma,  $k$ , mostra a taxa de assimetria da curva de Weibull. Valores de  $k$  mais altos (entre 2 e 3) significam que a curva é mais inclinada para velocidades de vento mais alta, e valores mais baixos (entre 1 e 2) significam que a curva é mais inclinada para velocidades de vento mais baixas, indicando que velocidades de vento mais baixas são mais prováveis de acontecer (GRAH et al., 2014).

O fator de escala,  $c$ , mostra o valor de pico da curva de Weibull. De fato, maiores módulos de  $c$  significam que a frequência de velocidades do vento é distribuída por um intervalo mais amplo (MOSTAFAEIPOUR et al., 2011).

A Eq. (3) descreve o comportamento dos ventos, num período de tempo, e tem como resultado uma representação gráfica, donde o fator de forma  $k=2$  é um dos parâmetros esperados pois demonstra, segundo Pinto (2013), que trata-se de uma região favorável para instalação de turbinas eólicas.

### 2.5 Rosa dos ventos

A rosa dos ventos é um histograma polar que apresenta a distribuição das direções dos ventos numa dada época. Segundo Pinto (2013), esta é uma ferramenta convencional para a apresentação do comportamento da velocidade e direção do vento e como estão subdivididos na região de estudo.

É apresentada da seguinte forma: são 4 pontos cardeais (norte, sul, leste, oeste), 4 pontos colaterais (nordeste, noroeste, sudeste, sudoeste) e 8 pontos subcolaterais (nor-nordeste, nor-noroeste, su-sudeste, su-sudoeste, lés-nordeste, lés-sudeste, oés-noroeste, oés-sudoeste).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Depois de tratados os dados, eles foram agrupados nas formas sazonal e anual. Então fez-se um comparativo entre eles de forma a obter os valores para os fatores de forma e escala, que são determinantes para o projeto de instalação de uma turbina. Além disso, com base nos dados referentes à direção dos ventos, foi gerada a rosa dos ventos (histograma polar) para determinar a direção predominante dos ventos na região.

#### 3.1 Distribuição sazonal da velocidade dos ventos

A Fig. 2 apresenta a variação do fator de forma de acordo com as estações do ano. Consta-se que os valores de  $k$  estão dentro de uma faixa entre 1,7 e 1,9, próximos do valor esperado, sendo perceptível também a aproximação do fator  $k$  para dados validados e não validados. Os dados tratados são de 2016 ao primeiro semestre de 2019 e, portanto, não foram obtidos valores para primavera e inverno de 2019.

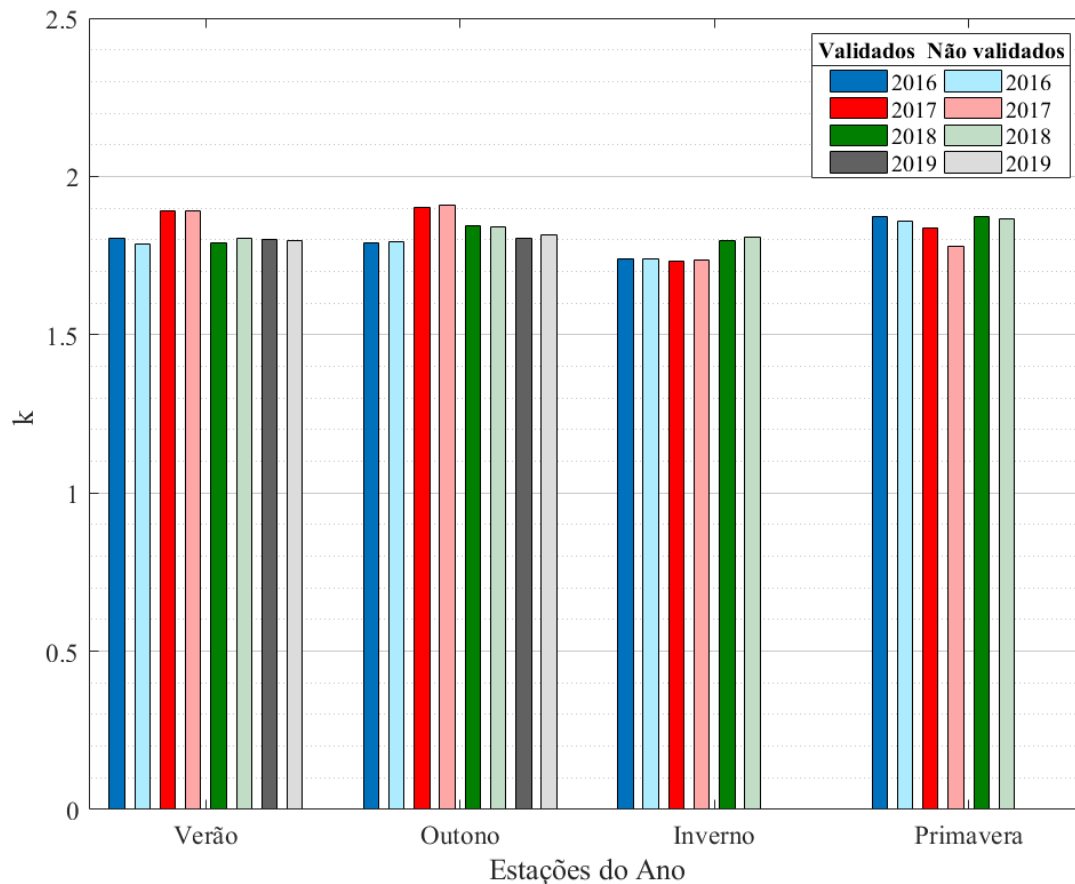


Figura 2 – Comparativo de fatores de forma por estação de ano para dados validados e não validados.

A Fig. 3 apresenta a variação do fator de escala de acordo com as estações do ano. Nota-se que para dados validados e não validados não houve diferença significativa. No entanto, é evidente que o fator de escala aponta valores maiores do que  $c=2 \text{ m/s}$  durante a primavera e verão da maioria dos anos analisados. Este valor representa um desvio da curva de distribuição de Weibull para faixas maiores de velocidade dos ventos.

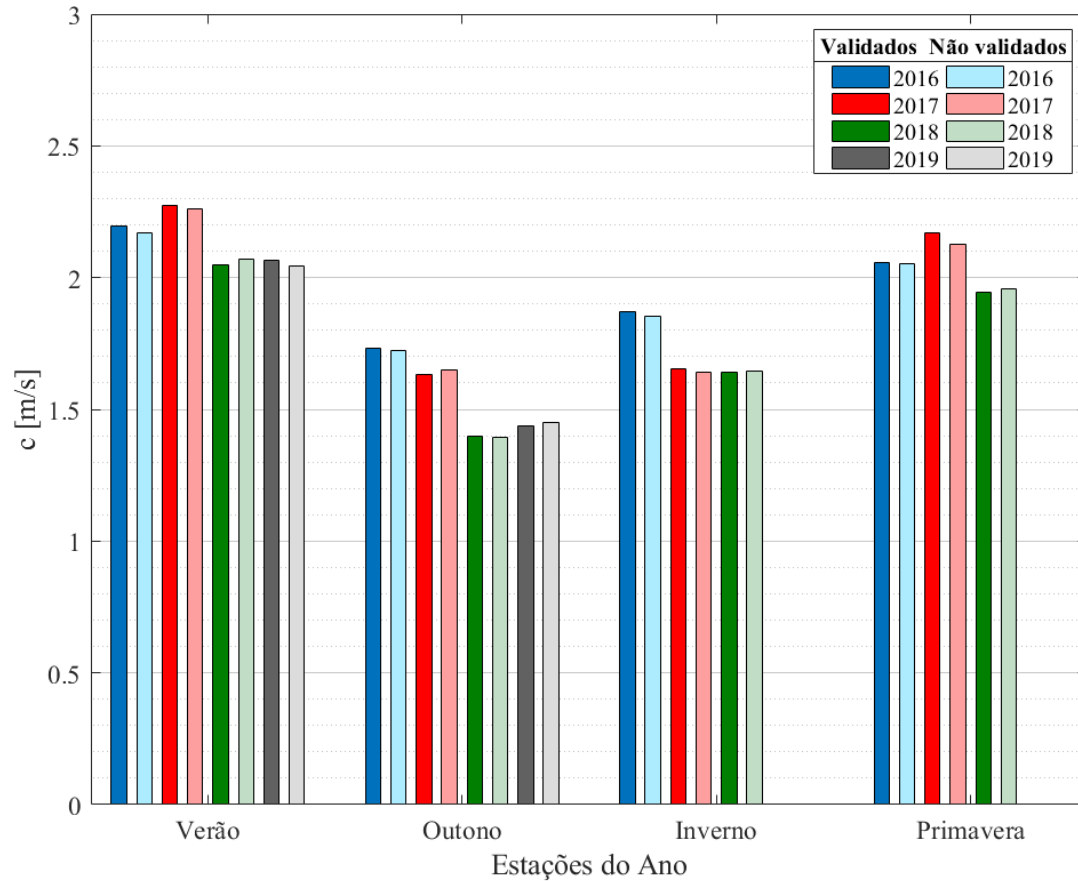


Figura 3 – Comparativo de fatores de escala por estação de ano para dados validados e não validados.

### 3.2 Distribuição anual da direção dos ventos

A Fig. 4 descreve a distribuição anual da direção dos ventos por meio da rosa dos ventos. Percebe-se que há predominância dos ventos na direção norte e noroeste ao longo dos anos. Este dado é relevante pois aponta um padrão da direção na região estudada, o que contribui para futuros projetos de instalação de turbinas.

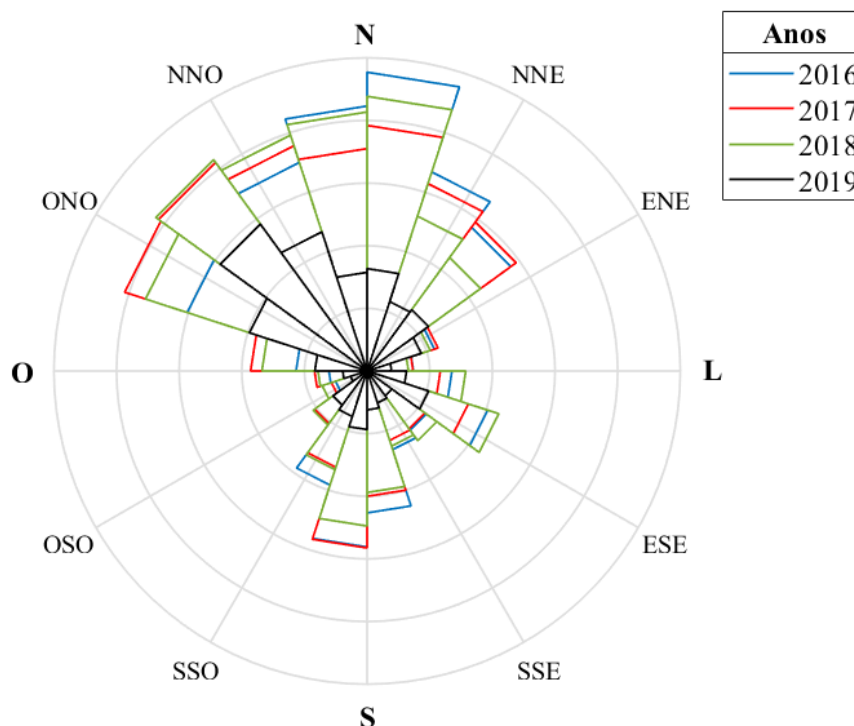


Figura 4 – Rosa dos ventos.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente artigo teve como objetivo realizar o tratamento de dados eólicos, a fim de obter o potencial eólico de Vitória-ES para a instalação de turbinas eólicas de pequeno porte e desse modo contribuir para futuros projetos com base em dados confiáveis. Por meio da caracterização da distribuição da direção e velocidade dos ventos é possível concluir que os dados meteorológicos medidos na estação do INMET de Vitória são bastante confiáveis, pois os dados não tratados estatisticamente apresentam um comportamento muito parecido com os dados tratados.

Baseado nos dados dos últimos 4 anos, os dados meteorológicos da cidade de Vitória apresentam um comportamento com boa repetibilidade sazonal. Este fato indica que, feitas as ponderações quanto à magnitude das velocidades, Vitória pode ser considerada uma cidade propícia ao uso de turbinas eólicas de pequeno porte.

As direções predominantes da região são norte e noroeste o que condiz com o apresentado pelo INMET.

#### *Agradecimentos*

Agradecemos primeiramente ao apoio dos nossos familiares, primordiais neste momento de busca por conhecimento, e também aos nossos professores pelo suporte durante nossa caminhada.

#### REFERÊNCIAS

- Cidades e Estados: Vitória. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/es/vitoria.html>. Acesso em: 6 dez. 2019.
- Dados Geográficos. Vitória - ES, set. 2014. Disponível em: <http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/geral/geograficos.asp>. Acesso em: 2 dez. 2019.
- Grah, V. F.; Ponciano, I. M.; Botrel, T. A. Potential for wind energy generation in Piracicaba, SP, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 5, p. 559–564, 2014.
- Kottek, M.; Greiser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 15, n.3, p. 259–263, 2006.

- Musial, W., Ram, B.. Large Scale On-shore Wind Power in the United States: Assessment of Opportunities and Barriers, NREL, September, 2010, p. 240. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/40745.pdf>
- Pinto, Milton de Oliveira. Fundamentos de energia eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- Sobre o INMET. Brasília - DF, 2019. Disponível em: [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sobre\\_inmet](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sobre_inmet). Acesso em: 2 dez. 2019.
- REN21, Renewables 2015 Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris, 2015. Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2015\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2015_Full-Report_English.pdf)
- Vitória em Mapas. Vitória - ES, set. 2014. Disponível em: <http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/geral/localizacao.asp>. Acesso em: 2 dez. 2019.
- Wind Resource Assessment Handbook: Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program. (April 1997). Prepared by AWS Scientific, Inc., NREL/SR-440-22223.
- WWEA, Small Wind World Report 2017, World Wind Energy Association, Germany, 2017. Disponível em: <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/>

**VIABILITY OF INSTALLATION OF SMALL WIND TURBINES IN URBAN ENVIRONMENT:  
VALIDATION OF METEOROLOGICAL DATA**

**Abstract.** *This paper presents a method for validating wind resource data and an annual estimate of the wind potential of the city of Vitória - ES. Its main objective is to analyze the reliability of wind speed and direction data, to study the feasibility of installing small wind turbines in an urban environment. The data used were provided by the National Institute of Meteorology (INMET) at an altitude of 9m, and the criteria for data validation were based on the Wind Resource Assessment Handbook: Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program, in which the data characterized as “physically possible” receive the digit 9, and data characterized as “extremely rare or suspicious” receive the digit 2. This paper uses the Weibull probability distribution for wind speed analysis and wind rose to check the best direction the turbine will be headed. The validation aims to reduce errors that may be present in the data provided, and will be used as a verification parameter of data that have no treatment.*

**Keywords:** *Wind energy, Weibull distribution, Validation data.*