

**ESTUDO PRELIMINAR PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM AEROGERADOR  
EÓLICO PARA O MUNICÍPIO DE PRESIDENTE KENNEDY NO ESTADO DO  
ESPÍRITO SANTO, BRASIL.**

**PRELIMINARY STUDY FOR THE DESIGN OF A WIND TURBINE FOR THE  
MUNICIPALITY OF PRESIDENTE KENNEDY IN THE STATE OF ESPÍRITO  
SANTO, BRAZIL.**

Taís Eliane Marques<sup>1</sup>, York Castillo Santiago<sup>2</sup>, Diego Mauricio Yepes<sup>3</sup> Maya, Maria Luiza Grillo  
Renó<sup>4</sup>, Osvaldo José Venturini<sup>5</sup>, Christian Jair Martínez Urrutia<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Mestranda em Engenharia de Energia, Grupo de pesquisa em Geração Termelétrica e Distribuída  
(NEST), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ambiental.marques@gmail.com

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia de Energia, NEST, UNIFEI, yorkcastillos@gmail.com

<sup>3</sup> Professor pesquisador, NEST, UNIFEI, yepesmayadiego@gmail.com

<sup>4</sup> Professor pesquisador, NEST, UNIFEI, malureno@unifei.edu.br

<sup>5</sup> Professor pesquisador, NEST, UNIFEI, osvaldo@unifei.edu.br

<sup>6</sup> Mestrando em Engenharia de Energia, UNIFEI, afriyeah2@hotmail.com

### **Resumo**

O presente trabalho evidencia um estudo preliminar para o dimensionamento de um aerogerador eólico com base nos dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo tomados os dados da velocidade dos ventos para cada hora do município de Presidente Kennedy no estado do Espírito Santo no período compreendido entre o dia 2 de setembro de 2017 e 1 de setembro de 2018. Os cálculos de potência do rotor e energia fornecida pelo aerogerador foram realizados tendo em conta altura de 69 metros da torre na estação meteorológica e uma altura de 85 metros do aerogerador modelo E-70 do fabricante ENERCON. Os resultados obtidos mostraram que existe um potencial eólico de geração de energia elétrica do aerogerador operando a 69 m de 128,2 MWh/ano aproximadamente, enquanto o aerogerador instalado a 85 m de altura teve um potencial de geração equivalente de 139,5 MWh/ano.

**Palavras-Chaves:** Energia eólica, Aerogerador, Velocidade de vento, Potência.

### **Abstract**

The present work evidences a preliminary study for the design of a wind turbine based on the data obtained by the National Institute of Meteorology (INMET), using data from the wind velocity for each hour of the municipality of Presidente Kennedy in the state of Espírito Santo

period between September 2, 2017 and September 1, 2018. The calculations of rotor power and energy supplied by the wind turbine were carried out taking into account the height of 69 meters of the tower in the meteorological station and a height of 85 meters of the aerogenerator model E-70 from the manufacturer ENERCON. The results showed that there is a wind power potential of the wind turbine operating at 69 m of 128.2 MWh / year, while the wind turbine installed at 85 m of height had an equivalent generation potential of 139.5 MWh/year.

**Keywords:** Wind power, Wind turbine, Wind speed, Power.

### Índice de quadros

Quadro 1. Resumo dos dados da Estação anemométrica de Presidente Kennedy. ....	6
Quadro 2. Faixas de velocidade e sua frequência correspondente. ....	12
Quadro 3. Cálculos de potência e energia do vento e aerogerador para 69 metros. ....	14
Quadro 4. Cálculos de potência e energia do vento e aerogerador para 85 metros. ....	15

### Índice de figuras.

Figura 1. Principais elementos geográficos do Estado do Espírito Santo .....	5
Figura 2. Dimensões do aerogerador.....	8
Figura 3. Relação $C_l/C_d$ em função do ângulo de ataque .....	9
Figura 4. Esquema da geometria dos perfis aerodinâmicos subsônicos .....	10
Figura 5. Comparação dos histogramas para as duas alturas objeto de estudo .....	13

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por novas fontes de energia é um dos grandes desafios a serem enfrentados no que se refere ao crescimento populacional e consumo de energia elétrica. O cenário atual configura uma sociedade dependente de uma demanda cada vez maior de energia. Ao longo dos últimos anos o fornecimento de energia foi consolidado de forma pouco sustentável resultando na atual busca por energias renováveis com a necessidade do desenvolvimento de tecnologias limpas e cada vez mais eficientes (MACHADO, 2017). Neste contexto, o presente trabalho aborda a energia do vento como uma fonte de energia promissora. A energia gerada pelos ventos é considerada uma fonte de energia renovável,

amplamente disponível, com baixo impacto ambiental e limpa. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) em dezembro de 2017, no Brasil contavam-se mais de 500 parques eólicos instalados por todo o país. Assim, a produção de eletricidade por esta via passa dos 12,4 GW sendo atualmente mais de 500 centrais com aproximadamente 6.600 aerogeradores em todo o território nacional com estimativa para 2020 de uma capacidade de operação de pelo menos 17 GW. Apesar da importância, viabilidade e necessidade em se investir na construção de parques eólicos, ainda existem muitos desafios, como a falta de planejamento, gestão e recursos, e que dificultam a construção desses empreendimentos (ABEEÓLICA, 2017).

A indústria da geração de energia elétrica a partir da força dos ventos é a que mais tem se expandido nas últimas décadas. Muitos países vêm investindo intensamente nesta opção, estendendo a suas plantas eólicas desde a sua porção terrestre (Onshore) ao seu mar territorial (Offshore), rumo ao crescimento sustentável. Além das vantagens decorrentes da característica renovável da energia eólica e de seu baixíssimo impacto ambiental, há ainda aquelas relacionadas tanto à possibilidade de implantação relativamente rápida, e a capacidade de resistir a flutuações de preços de commodities, o que a torna um recurso agregador de segurança energética. O Brasil, cujo potencial de expansão hidráulica caminha para o esgotamento, necessita diversificar sua matriz energética, preferencialmente com outras fontes renováveis de energia (ASPE, 2009). Neste contexto a energia eólica se apresenta, em conjunto com a bioenergia, como alternativas promissoras para a ampliação e diversificação da matriz energética brasileira.

### **1.1 Energia eólica e aerogeradores**

O aproveitamento da energia dos ventos requer a utilização de áreas adequadas, com velocidades médias anuais de vento que viabilizem a instalação de usinas. A produção de energia é bastante dependente das velocidades do vento, deste modo a avaliação da viabilidade técnica e econômica de plantas eólicas, de forma a assegurar resultados confiáveis da energia gerada na usina é importante. Uma usina eólio-elétrica (UEE) é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área. Usualmente a geração elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 2,5 a 3,0 m/s; abaixo destes valores o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente 12,0 - 15,0 m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por o estol aerodinâmico

(mecanismos de controle/sistema automático de proteção), dependendo do modelo de turbina (CRESESB, 2014). Ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento, e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina; neste caso, a rotação das pás é reduzida – por passo ou estol, e a unidade geradora é desconectada da rede elétrica (ASPE, 2009). Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, através de atuadores rápidos, softwares e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes.

Para a determinação do recurso eólico normalmente é necessário uma rede anemométrica qualificada (equipamentos com alta confiabilidade, durabilidade e adequadamente dispostos em torres de medições de 50 a 70 m, com anemômetros previamente calibrados em túnel de vento e um sistema eficiente de coleta de dados e verificação de falhas), operando por um período mínimo de um ano. A influência da altitude e da temperatura na densidade local do ar, o fator de disponibilidade esperado e a avaliação das perdas energéticas por interferência aerodinâmica entre rotores precisam ser considerados (ASPE, 2009).

Uma turbina eólica tem a função de captar uma parte da energia cinética do vento, que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. Os geradores eólicos encontram-se em franco desenvolvimento tecnológico, tendo como principal tendência o aumento progressivo nas dimensões e capacidades das turbinas. Um aerogerador moderno de grande porte é constituído, basicamente, por um rotor de três pás conectado por um eixo a um sistema de geração alojado em uma nacela. A localização e características dos principais componentes e sistemas encontrados na nacela, podem variar significativamente entre os diversos modelos de turbinas atualmente em fabricação (ASPE, 2009).

A realização de estudos climatológicos de dados medidos, sempre que seja possível, através de estudos de correlação e ajustes a partir de dados de medições de longo prazo próximas ao local onde será instalado o empreendimento eólico, contribuirá para a avaliação das variações vento anuais, bem como o seu impacto na geração energética ao longo de toda a vida útil da usina (aproximadamente 20 anos). É recomendável que as medições anemométricas sejam mantidas por todo o período de operação da usina, possibilitando um acompanhamento contínuo do desempenho das turbinas e melhorando as estimativas de longo prazo (MACHADO, 2017).

O principal objetivo deste estudo foi dimensionar um aerogerador eólico que possa ser implantado no município de presidente Kennedy – Espírito Santo, para aproveitar o potencial disponível no vento de acordo os dados anemométricos locais. O dimensionamento do

aerogerador similar ao comercializado pela empresa ENERCON torna-se um desafio, por se tratar de uma tecnologia em que parte dos dados de projeto não são disponibilizados pelo fabricante, por conseguinte tal fator acarreta a escassez de informações sobre a tecnologia.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização geográfica

A área estudada abrange o estado do Espírito Santo que está localizado na região sudeste do Brasil, e pode ser dividido geograficamente em: a zona dos tabuleiros e a região serrana. A região dos tabuleiros, com altitudes em torno de 50 m, compreende a faixa da baixada litorânea e é caracterizada pela floresta de tabuleiros, uma vegetação densa, com árvores de altura superior a 30m. Os principais elementos geográficos da região serrana capixaba (ver Figura 1) são a Serra do Caparaó, que abriga o terceiro ponto mais alto do Brasil e pico da Bandeira, com altitude de 2.892 m. A Região Serrana é tomada por maciços, montanhosos cortados por rios de vales profundos. Sobre a cobertura original de floresta Atlântica de altitude, intensamente explorada, dando lugar em grande parte a uma capoeira alta e rica em imbaúbas.

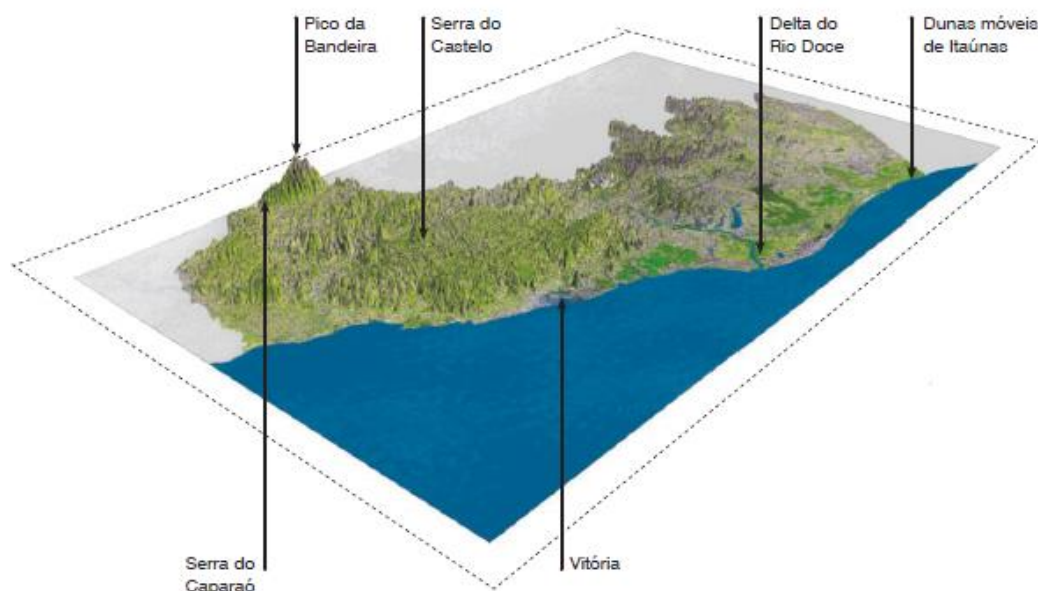


Figura 1. Principais elementos geográficos do Estado do Espírito Santo. Fonte: ASPE, 2009

Figure 1. Main geographic elements of the State of Espírito Santo. Source: ASPE, 2009

## 2.2 Medições do vento

### 2.2.1 Comportamento do vento

Em sua aparente imprevisibilidade, o vento resulta da contínua circulação das camadas de ar da atmosfera, sob a ação predominante da energia radiante do sol e da rotação da Terra. Dentre os mecanismos atuantes na formação dos ventos, destacam-se os aquecimentos desiguais da superfície terrestre, que ocorrem tanto em escala global (diferentes latitudes, estações do ano e ciclo dia-noite), quando local (mar-terra, montanha-vale). Desse fato resulta que as velocidades apresentam tendências sazonais e diurnas bem definidas. O vento pode variar bastante no intervalo de horas ou dias, porém em termos estatísticos, tenderá a um regime diurno predominante, regido por influências locais e regionais, microescala e mesoescala respectivamente (ASPE, 2009).

A distribuição geral dos ventos sobre o Brasil, que afeta o Espírito Santo, está relacionada à diversidade das características do terreno, tais como geometria e altitude, ocorrência de obstáculos, cobertura vegetal, albedo e grandes extensões de massas de água. Estes fatores atuantes nas escalas menores podem resultar em regimes de vento locais bastante distintos. Os dados da velocidade do vento assim como de temperatura, foram obtidos da estação anemométrica automática de Presidente Kennedy localizada na região do Espírito Santo a uma altura de 69 metros como é representado no Quadro 1. Estes dados são coletados cada hora para um total de 24 dados no dia. Desta forma, os dados para a análise apresentada foram medidos por um período de um ano (02/09/2017 até 01/09/2018) resultando em um total de 8760 dados.

Quadro 1. Resumo dos dados da Estação anemométrica de Presidente Kennedy.

Fonte: adaptado de INMET (2018).

Table 1. Summary of data from Presidente Kennedy's anemometric station.

Source: adapted from INMET (2018).

<b>Estação</b>	Presidente Kennedy -A622
<b>Estado</b>	Espírito Santo
<b>Latitude</b>	-21,100805°
<b>Longitude</b>	-41,039395°
<b>Temperatura</b>	Máx: 21,6° Mín: 20,9°
<b>Altitude</b>	69 metros
<b>Período de medição</b>	02/09/2017 a 01/09/2018

### 2.2.2 Rugosidade do terreno

Ao longo de décadas, em geral, as velocidades médias anuais apresentam variações inferiores a 10% da média de longo prazo. Em alturas de até 100 m, de interesse ao aproveitamento energético, o vento é afetado de forma acentuada pelas condições de relevo e de rugosidade aerodinâmica do terreno, presença de obstáculos e estabilidade térmica vertical.

Segundo dados do atlas eólico do Espírito Santo, o município de Presidente Kennedy, área litorânea, apresenta baixa rugosidade, com velocidades médias anuais em torno de 6,5 m/s (a 50 m de altura). O aproveitamento da energia dos ventos pode de modo complementar, alavancar o crescimento econômico e a autosustentabilidade energética do Estado.

## 2.3 Estudo dos Dados

### 2.3.1 Cálculo da potência e da energia disponível no vento

A potência disponível no vento pode ser calculada com os dados de densidade do ar, área do rotor e velocidade do vento como é mostrado na equação (1):

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (1)$$

Onde:

$P_{vento}$  = potência disponível no vento [W]

$\rho$  = densidade do ar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$A$  = área do rotor [ $\text{m}^2$ ]

$v$  = velocidade do vento [m/s]

A densidade é função da temperatura, porém pode ser calculada com a equação (2):

$$\rho = \frac{353,049}{T} \times e^{-0,034 \times \frac{Z}{T}} \quad (2)$$

Onde:

$T$  = temperatura média do ano no local de estudo, a qual foi calculada com os dados fornecidos pela estação meteorológica, tendo como resultado 296,7 K.

$Z$  = soma da altura da cidade sobre o nível do mar (55 metros) e da torre (69 metros)

Área do rotor pode ser calculada como segue na equação (3):

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

Onde D é o diâmetro em metros, sendo adotado para este estudo o aerogerador modelo E-70 do fabricante ENERCON, o qual tem um diâmetro de 71 metros, uma altura de 85 metros e um comprimento das de 40,2 metros como é mostrado na Figura 2.

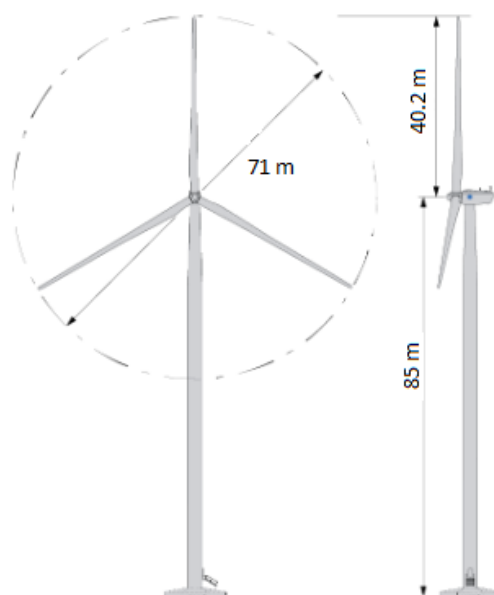


Figura 2. Dimensões do aerogerador. Fonte: adaptado de ENERCON (2018)

Figure 2. Dimensions of the wind turbine. Source: adapted from ENERCON (2018)

Obtendo os valores de densidade da equação (2) e de área com a equação (3), foi calculada a potência para cada faixa de velocidade na equação (1). Todos os resultados foram divididos por 1.000 para levá-los a quilowatts (kW).

Conhecendo a potência, já é possível calcular a energia como mostra a equação (4):

$$E_{vento} = P_{vento} \times t \quad (4)$$

Onde:

$E_{vento}$  = energia disponível no vento [kWh]

$P_{vento}$  = potência disponível no vento [kW]

t = tempo [horas]

### 2.3.2 Cálculo da energia fornecida pelo aerogerador

Para calcular a energia fornecida pelo aerogerador, primeiro deve ser calculada a potência desenvolvida pelo rotor. Para isto é necessário conhecer o coeficiente de potência ( $C_p$ ) como é mostrado na equação (5):

$$C_p = \frac{\text{potência no rotor}}{\text{potência do vento}} \quad (5)$$



Neste ponto se tem uma equação com duas incógnitas que são  $C_p$  e potência no rotor, porém precisamos de equação (6) para calcular o valor de  $C_p$ :

$$C_p = \frac{16}{27} \lambda \left[ \lambda + \frac{1,32 + \left(\frac{\lambda - 8}{20}\right)^2}{n^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - \frac{0,57 \lambda^2}{\frac{C_l}{C_d} \left( \lambda + \frac{1}{2n} \right)} \quad (6)$$

Onde:

$n$  = número de pás, (para este estudo são três pás)

$\lambda$  = razão de velocidade específica (TSR, em inglês)

$C_l/C_d$  = relação entre o coeficiente de sustentação e de arrasto

A equação (7) é usada para calcular  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{rpm \times \pi \times D}{60 \times v} \quad (7)$$

Onde:

$v$  = velocidade do vento [m/s] para cada faixa de estudo.

$D$  = diâmetro do rotor, que para este aerogerador é 71 metros.

Rpm = Rotações por minuto, dado fornecido pelo fabricante e tem um valor de 14.

$C_l/C_d$  é calculado tendo em conta o perfil da Figura 3, em função do ângulo de ataque e do número de Reynolds, o qual está representado na equação (8)

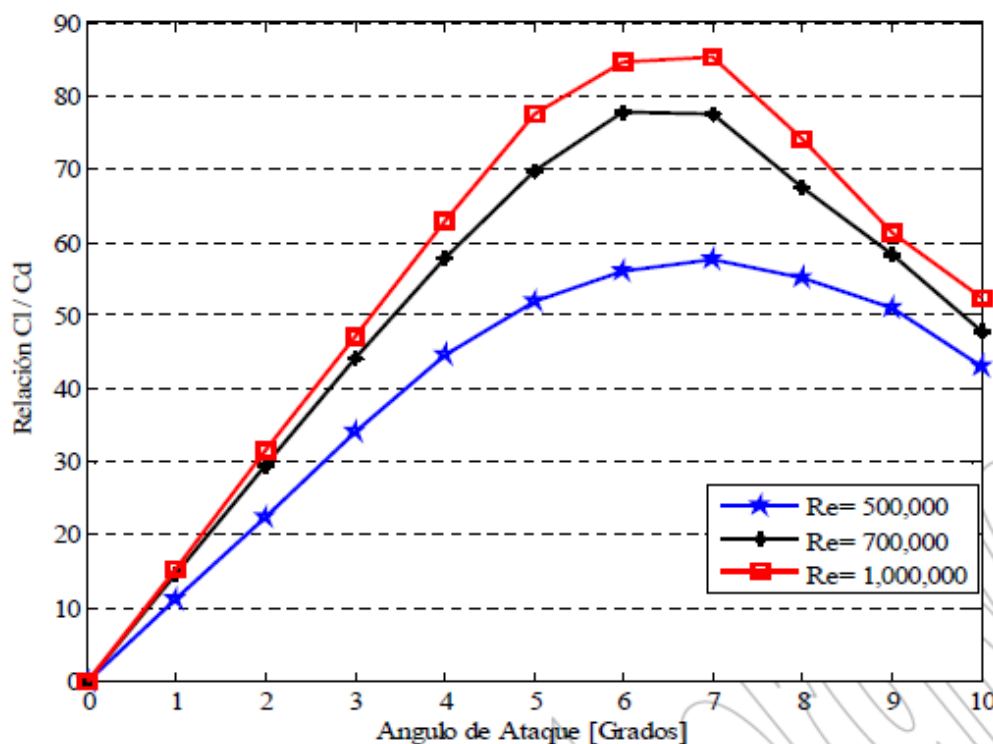


Figura 3. Relação  $C_l/C_d$  em função do ângulo de ataque. Fonte: Carantoña, (2009)

Figure 3.  $C_l/C_d$  ratio as a function of the angle of attack. Source: Carantoña (2009)

$$Re = \frac{\rho \times v \times C}{\mu} \quad (8)$$

Onde:

$\rho$  = densidade do ar, que foi calculada na equação (2) dando como resultado 1,1731 kg/m<sup>3</sup>

$v$  = velocidade disponível no vento para as diferentes faixas. [m/s]

$C$  = a corda

$\mu$  = viscosidade dinâmica do ar em Pa·s.

Sabendo que o ar atmosférico pode ser considerado um gás ideal, a viscosidade pode ser calculada em função da temperatura segundo a lei de Sutherland, como é apresentado na equação (9):

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C_S}{T + C_S} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

Onde:

$\mu_0$  = viscosidade a  $T_0$ , que tem um valor de  $1,8 \times 10^{-5}$  Pa·s (HUGH; FREEDMAN, 2009)

$T_0$  = temperatura de referência com valor de 293,15 K

$T$  = temperatura média do ano de 296,7 K

$C_S$  = constante de Sutherland, que para o ar é de 113 K (SUTHERLAND, 1893).

Depois de realizar os cálculos, o valor encontrado para a viscosidade do ar para as condições do local estudado foi de  $1,816 \times 10^{-5}$  Pa·s.

A corda do perfil de comprimento  $c$  é a linha reta que une a borda principal com a borda de fuga como é representado na Figura 4. Para o perfil MH-106, a corda tem um valor de 1 metro com relação a um diâmetro de 14 m segundo Hepperle (2018), portanto fazendo um fator de conversação para o diâmetro de 71 metros do rotor, obteve-se:  $c = 5,07$  metros.

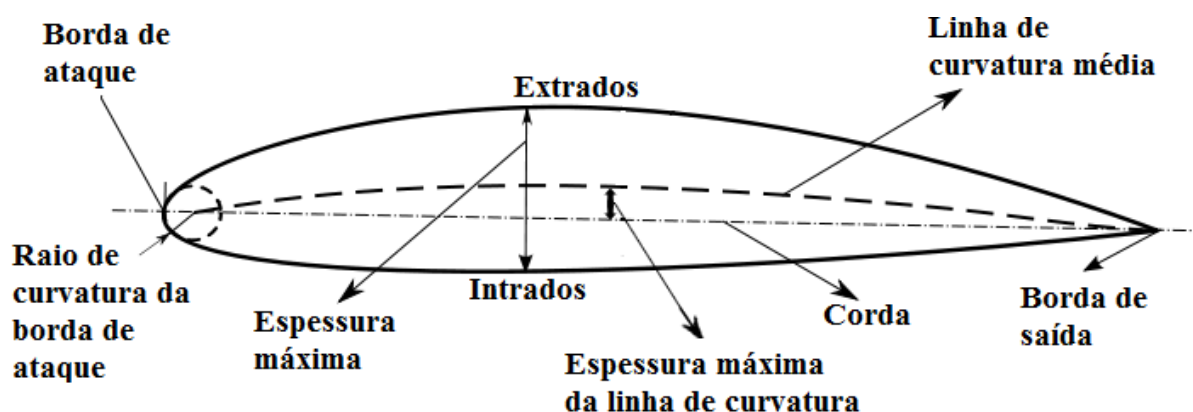


Figura 4. Esquema da geometria dos perfis aerodinâmicos subsonicos. Fonte: Martinez, (2014)

Figure 4. Schematic of the geometry of subsonic aerodynamic profiles. Source: Martinez, (2014)

Com os valores de viscosidade, de corda e da densidade, pode-se calcular o número de Reynolds para cada velocidade tal como na equação (8). É importante mencionar que a maioria dos valores do número de Reynolds deram acima de 1.000.000, por esta razão é necessário fazer uma extrapolação linear entre os valores de ângulos de ataque de 0 e 5, posto que eles apresentam um comportamento linear. Neste caso, assumiu-se um ângulo de ataque de 3 para ter um valor médio na tendência linear e assim poder calcular a relação  $C_l/C_d$ .

Com os valores calculados de  $C_l/C_d$  da Figura 3, e de  $\lambda$  pela equação (7), pode-se calcular  $C_p$  na equação (6) e assim a potência do rotor transformando a equação (5) em (10):

$$P_{rotor} = P_{vento} \times C_p \quad (10)$$

A potência de rotor é um valor útil para o cálculo da energia fornecida pelo aerogerador como é indicado na equação (11)

$$E = P_{rotor} \times \eta_t \times t \quad (11)$$

Onde:

$\eta_t$  = eficiências dos rolamentos, caixa de velocidade, gerador, conversor de frequência, compensação de potência reativa e filtros harmônicos, transformador. Segundo Hau & von Renouard (2006), este valor é igual a 88%.

$P_{rotor}$  = potência no rotor [kW]

$t$  = tempo [h]

### 2.3.3 Ajustes das velocidades e temperatura média do ano.

ENERCON para o modelo E-70, fabrica as torres a uma altura diferente (85 m) da torre que foi usada na estação meteorológica da cidade Presidente Kennedy (69 m). Por esta razão foi necessário realizar ajustes de velocidades aplicando a Lei Logarítmica da equação (12), a qual considera a rugosidade do terreno em cada expressão logarítmica da altura  $Z$  e altura de referência  $Z_r$ :

$$v_z = v_{zr} \times \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_0}\right)} \quad (12)$$

Onde:

$v_z$  = velocidade na altura de referência [m/s]

$v_z$  = velocidade na altura desejada [m/s]

$Z_r$  = altura de referência, 69 metros.

$Z$  = altura desejada, 85 metros.

$Z_0$  = comprimento de rugosidade do local, que segundo ASPE (2009) foi de 0,08 m

A temperatura média do ano também varia em função de diferença de altura. A temperatura foi calculada por meio de uma extrapolação sabendo que a temperatura varia 6,5°C cada 1000m (BROWER et al., 2012), dando como resultado 296,58 K. A densidade e viscosidade geraram mudanças pouco significativas – 1,1714 kg/m<sup>3</sup> e 1,816 x 10<sup>-5</sup>, respectivamente.

Conforme à base de cálculos mostrada na seção 3.3.1 e 3.3.2, também foram calculados a potência do vento, a potência do rotor e a energia fornecida pelo aerogerador, tendo em conta os novos valores de velocidades e temperatura média para a altura de 85 m. A velocidade de projeto foi a mesma que para altura de 69 m, ou seja, 7,5 m/s, mas foi evidenciado uma maior energia fornecida pelo aerogerador para cada faixa de velocidade.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a análise de dados e cálculos segundo a metodologia descrita anteriormente, obteve-se os seguintes resultados:

#### 3.1 Representação estatística das velocidades dos ventos

Uma vez recebido os dados da estação meteorológica, as velocidades foram classificadas em faixas e calculou-se a frequência de ocorrência para cada um de esses intervalos como é mostrado no Quadro 2 e posteriormente foram construídos os histogramas que estão representados na Figura 5. Esta representação foi feita para a altura de 69 m fornecida pela estação e de 85 para cumprir com altura do fabricante do aerogerador.

Quadro 2. Faixas de velocidade e sua frequência correspondente.

Fonte: autores.

Table 2. Velocity bands and their corresponding frequency.

Source: authors.

Altura 69 m		Altura 85 m	
Velocidade (m/s)	Tempo (h)	Velocidade (m/s)	Tempo (h)
0 – 1	685	0 – 1	685
1 – 2	2.045	1 – 2	1.856
2 – 3	1.696	2 – 3	1.733
3 – 4	1.319	3 – 4	1.340
4 – 5	1.041	4 – 5	972
5 – 6	708	5 – 6	794
6 – 7	464	6 – 7	504

7 – 8	310	7 – 8	338
8 – 9	171	8 – 9	178
9 – 10	134	9 – 10	136
10 – 11	90	10 – 11	111
11 – 12	56	11 – 12	53
12 – 13	28	12 – 13	43
13 – 14	8	13 – 14	11
14 – 15	3	14 – 15	4
15 – 16	2	15 – 16	2

Histograma para 69 m de altura

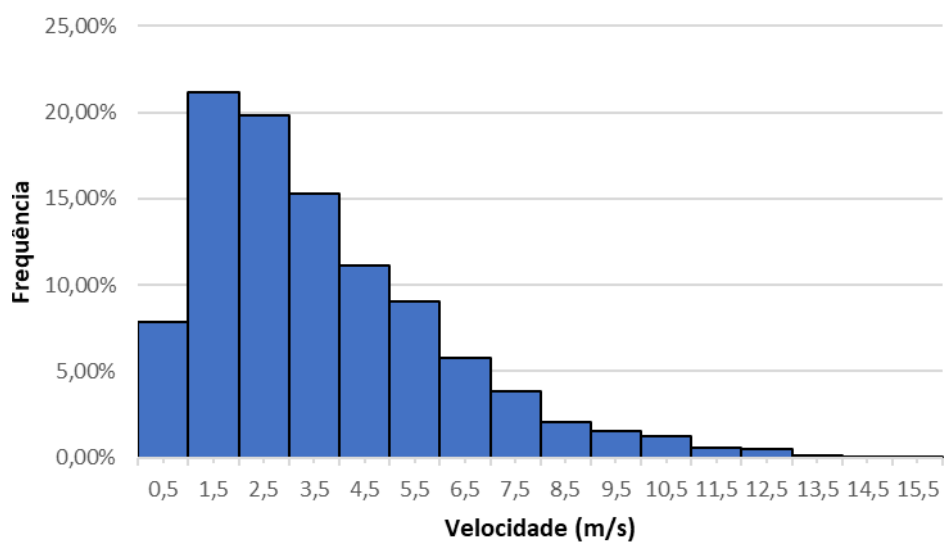
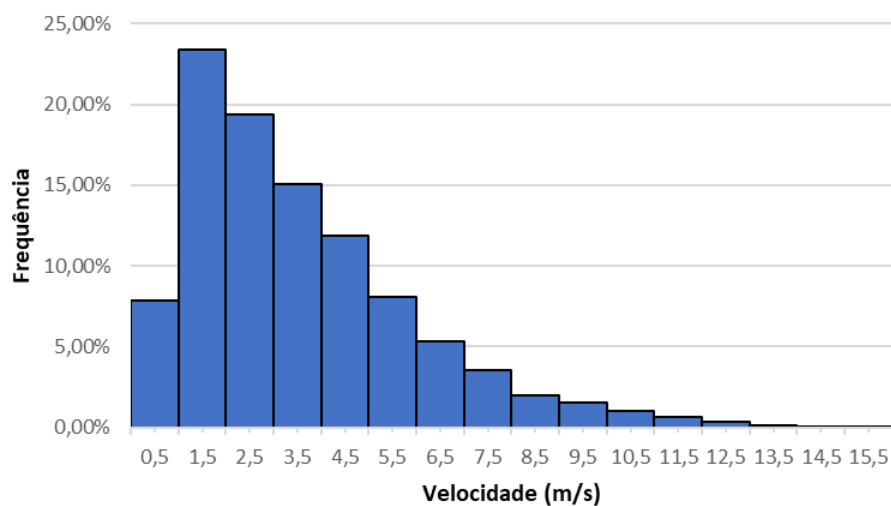


Figura 5. Comparação dos histogramas para as duas alturas objeto de estudo. Fonte: autores

Figure 5. Comparison of the histograms for the two heights under study. Source: authors

De acordo com os dados apresentados Quadro 2, verifica-se que o maior número de horas foi encontrado na faixa de velocidade entre 1 - 2 m/s para as duas alturas objeto de estudo, seguido da faixa entre 2 – 3 m/s e finalmente de 3 – 4 m/s, sendo estas três faixas as únicas que superam as 1.300 horas.

Embora a tendência dos histogramas da Figura 5 seja a mesma para os dois casos, é possível apontar certas diferenças consideráveis entre eles. Por exemplo, para 85 metros de altura a faixa entre 1 – 2 m/s teve uma diminuição na sua frequência, mas na faixa entre 5 – 6 m/s teve um aumento.

### 3.2 Velocidade de projeto para o cálculo da energia fornecida pelo aerogerador.

Os Quadros 3 e 4 são apresentados os resultados obtidos ao realizar os procedimentos estabelecidos nos itens 2.3.1 e 2.3.2 para as duas alturas objeto de estudo, onde os dados destacados nas células de cor amarela indicam a velocidade de projeto (7,5 m/s), evidenciando a faixa em que o aerogerador fornece a maior quantidade de energia. Nas células de cor cinza não foram realizados os cálculos de  $C_p$ , devido a que um critério da equação (6) em que é definido que  $\lambda$  deve estar numa faixa de valores entre 4 e 20.

Quadro 3. Cálculos de potência e energia do vento e aerogerador para 69 metros.

Fonte: autores.

Table 3. Power and wind energy calculations and wind turbine for 69 meters.

Source: authors.

Vel. (m/s)	Freq. (h)	Pot. Vento (Kw)	Ener. Vento (kWh)	TSR	Re	cl/cd	$C_p$	Pot. Rotor (Kw)	Ener. Aerog (kWh)
0,5	685	0,29	198,85	104,09					
1,5	2.045	7,84	16.028,29	34,7					
2,5	1.696	36,29	61.541,21	20,82	818.610,386	45,24	0,31	11,23	16.719,67
3,5	1.319	99,57	131.331,55	14,87	1.146.054,54	48,67	0,394	39,24	45.411,2
4,5	1.041	211,62	220.296,91	11,57	1.473.498,7	52,1	0,436	92,34	84.346,72
5,5	708	386,37	273.552,98	9,46	1.800.942,85	55,53	0,46	177,64	110.360,22
6,5	464	637,76	295.922,63	8,01	2.128.387	58,96	0,473	301,82	122.887,36
7,5	310	979,72	303.714,56	6,94	2.455.831,16	62,39	0,481	471,19	128.171,53
8,5	171	1.426,19	243.878,22	6,12	2.783.275,31	65,83	0,485	691,69	103.787,28
9,5	134	1.991,09	266.806,09	5,48	3.110.719,47	69,26	0,487	968,97	113.934,07
10,5	90	2.688,36	241.952,73	4,96	3.438.163,62	72,69	0,487	1.308,39	103.327,69
11,5	56	3.531,94	197.788,79	4,53	3.765.607,78	76,12	0,486	1.715,02	84.274,14
12,5	28	4.535,76	127.001,31	4,16	4.093.051,93	79,55	0,484	2.193,69	53.897,82
13,5	8	5.713,75	45.710,02	3,86					

14,5	3	7.079,85	21.239,55	3,59					
15,5	2	8.647,99	17.295,98	3,36					

Quadro 4. Cálculos de potência e energia do vento e aerogerador para 85 metros.

Fonte: autores.

Table 4. Power and wind energy calculations and wind generator for 85 meters.

Source: authors.

Vel. (m/s)	Freq. (h)	Pot. vento (kW)	Ener. vento (kWh)	TSR	Re	cl/cd	Cp	Pot. Rotor (kW)	Ener. Aerog (kWh)
0,5	685	0,29	198,56	104,09					
1,5	1.856	7,83	14.526,02	34,7					
2,5	1.733	36,23	62.793,32	20,82	817.686,545	45,23	0,31	11,22	17.056,78
3,5	1.340	99,43	133.230,55	14,87	1.144.761,16	48,66	0,394	39,17	46.062,22
4,5	972	211,32	205.399,17	11,57	1.471.835,78	52,09	0,436	92,2	78.635,19
5,5	794	385,82	306.339,82	9,46	1.798.910,4	55,51	0,46	177,37	123.577,66
6,5	504	636,85	320.970,77	8,01	2.125.985,02	58,94	0,473	301,37	133.279,95
7,5	338	978,31	330.670,44	6,94	2.453.059,63	62,37	0,481	470,48	139.538,9
8,5	178	1.424,14	253.496,32	6,12	2.780.134,25	65,79	0,485	690,66	107.874,71
9,5	136	1.988,23	270.398,7	5,48	3.107.208,87	69,22	0,487	967,53	115.462,71
10,5	111	2.684,5	297.979,06	4,96	3.434.283,49	72,65	0,487	1.306,45	127.248,65
11,5	53	3.526,86	186.923,66	4,53	3.761.358,1	76,07	0,486	1.712,49	79.641,57
12,5	43	4.529,24	194.757,13	4,16	4.088.432,72	79,5	0,484	2.190,46	82.649,59
13,5	11	5.705,53	62.760,86	3,86					
14,5	4	7.069,67	28.278,66	3,59					
15,5	2	8.635,55	17.271,1	3,36					

Observou-se que, a potência do rotor e a energia fornecida pelo aerogerador aumentam com a altura, devido à influência que tem sobre a densidade, bem como sobre a potência do ar e sobre o número de Reynolds que ao mesmo tempo tem um impacto no coeficiente de potência.

#### 4. CONCLUSÃO

Segundo os valores calculados de energia disponível no vento nas diferentes alturas estudadas, conclui-se que existe um grande potencial eólico na cidade Presidente Kennedy na região do Litoral do estado de Espírito Santo. Para 69 m de altura, o máximo valor de energia disponível no vento (303,71 MWh) apresenta-se para as velocidades entre 7-8 m/s e para 85 m de altura, o máximo valor de energia disponível no vento (330,67 MWh) apresenta-se para as velocidades entre 7-8 m/s.

A maior altura, o potencial eólico de geração de energia elétrica para um aerogerador será maior, isto foi evidenciado para o caso estudo, pois a 69 m de altura o potencial do aerogerador foi estimado em 128,2 MWh/ano aproximadamente, enquanto que para 85 m de altura o aerogerador apresentou um potencial de geração equivalente de 139,5 MWh/ano, o qual concorda com a energia disponível no vento calculado para cada altura.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), e a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo suporte para o desenvolvimento tecnológico e científico.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2017**. [s.l: s.n.].
- ASPE. Atlas Eólico - Espírito Santo. p. 91, 2009.
- BROWER, M. C. et al. **Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project**. [s.l: s.n.].
- CARANTOÑA, A. Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia. p. 41, 2009.
- CRESESB, C. DE R. PARA E. S. E E. S. B. **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**.
- ENERCON. **Enercon, energy for the world**. Disponível em: <<https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>>. Acesso em: 11 set. 2018.
- HAU, E.; VON RENOUARD, H. **Wind Turbines**. [s.l: s.n.].
- HEPPERLE, M. **Aerodynamic Design of a Windmill**. Disponível em: <<https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/windmill.htm>>. Acesso em: 11 set. 2018.
- HUGH, Y.; FREEDMAN, R. Física Universitaria Vol.1. **Pearson Educación**, p. 760, 2009.
- INMET, I. N. DE M. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática**.
- MACHADO, A. H. Dimensionamento De Parque Eólico No Estado Do Espírito Santo. **Revista Energia na Agricultura**, v. 32, p. 72–80, 2017.
- MARTINEZ FERRO, E. J. Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles. n. October 2012, 2014.
- SUTHERLAND, W. LII. *The viscosity of gases and molecular force*. **Philosophical Magazine Series 5**, v. 36, n. 223, p. 507–531, 1893.