

FACULDADE CIÊNCIAS DA VIDA - FCV

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: Análise da viabilidade de instalação de uma turbina eólica sem hélice em uma residência na área urbana de Curvelo/MG.

Willian Jorge Silva Xavier¹

Leandro de Oliveira Souza Nunes²

RESUMO

Com o passar dos anos, a geração de energia tende a se modernizar com os avanços tecnológicos. Pensando no desenvolvimento sustentável, a *Vortex Bladeless*, está construindo uma turbina eólica sem hélice que garante a produção de energia renovável sem afetar negativamente o meio ambiente, pois gera um baixo ruído, não interfere nas rotas migratórias das aves e possui baixa manutenção em comparação com as turbinas convencionais, além de poder ser instalada em diversos locais e em maior quantidade. A *Vortex Tacoma* é uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV), com 2,75 metros de altura que consiste em uma base fixa e uma haste móvel de formato cilíndrico, que oscila com a velocidade do vento, gerando vórtices que fazem vibrar e entrar em ressonância.

Os vórtices criam esteiras alternadas, denominadas de esteiras de *vón Kármán* que causam instabilidades para construções altas. Com esse conceito, a Vortex concebeu o aerogerador para maximizar esse efeito utilizando das vibrações induzidas por vórtices (VIV), para a geração de energia elétrica segundo a lei de indução eletromagnética de Michael Faraday, que utiliza da variação do campo magnético para produzir uma força eletromotriz induzida (f.e.m.).

A cidade de Curvelo possui a maior parte do terreno plano, caracterizado por planaltos, na altitude de 672 metros em relação ao nível do mar. Por estar distante do mar e posicionada na região central do estado, possui um clima quente com variações maiores de temperatura que cidades litorâneas.

Palavra-Chave: Turbina, *Vortex Bladeless*, Sustentável, VIV, Força Eletromotriz, Curvelo, TEEV.

¹ Graduando do curso de Engenharia Mecânica, da Faculdade Ciências da Vida. willianjorge08@gmail.com

² Especialista em Engenharia de Automação Industrial e Eletrônica Industrial (UNYLEYA); Professor do curso de Engenharia Mecânica, da Faculdade Ciências da Vida. leonunesdesign@gmail.com

ABSTRACT

Over the years, power generation tends to modernize with technological advances. With sustainable development in mind, Vortex Bladeless is building a propellerless wind turbine that guarantees the production of renewable energy without negatively affecting the environment, as it generates low noise, does not interfere with the migratory routes of birds, and has low maintenance compared to the conventional turbines, in addition to being able to be installed in several places and larger quantities. The Vortex Tacoma is a 2.75-meter high vertical axis wind turbine (TEEV) consisting of a fixed base and a cylindrical mobile rod, which oscillates with the speed of the wind, generating vortices that vibrate and enter in resonance..

Vortexes create alternating mats, called von Kármán's way, which cause instabilities for tall buildings. With this concept, Vortex designed the wind turbine to maximize this effect using vortex-induced vibrations (VIV) to generate electrical energy according to Michael Faraday's electromagnetic induction law, which uses the variation of the magnetic field to produce a force-induced electromotive (emf).

The city of Curvelo has the most part of your terrain flat, characterized by plateaus, at an altitude of 672 meters above sea level. As it is far from the sea and located in the central region of the state, it has a hot climate with greater variations in temperature than coastal cities.

Keywords: Turbine, Vortex Bladeless, Sustainable, VIV, Electromotive Force, Curvelo, TEEV.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente consumo de energia elétrica, impulsionado pelo aumento da população mundial e de novas tecnologias, foram desenvolvidos diversos projetos ao longo dos anos para suprir essa demanda energética. Devido a isso, se faz necessário um meio sustentável de produção que evite principalmente a poluição ambiental causada pelas outras formas de obtenção de energia elétrica, como a nuclear e a termoelétrica, aliadas ao baixo custo de manutenção.

No mercado de turbinas eólicas, segundo CRAVEIRO e MATOS (2016), pode-se classificá-las conforme a posição do seu eixo de rotação, como: turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) e turbina eólica de eixo vertical (TEEV). Com a percepção de que as turbinas eólicas comuns possuem grandes dimensões e que devem ser instaladas em locais com um maior fluxo de ar, além dos danos causados as aves, a *start-up* espanhola *Vortex Bladeless* desenvolveu um modelo de turbina que aproveita de um problema de vibrações excessivas sofridas pelas TEEVs para produzir energia elétrica. Deste modo está em fase de testes o modelo *Vortex Tacoma*, uma turbina sem hélices que possui 2,75 metros de altura e pode ser instalada em residências. Partindo disso, este trabalho visa verificar as vantagens de se instalar uma turbina deste modelo em uma residência na área urbana de Curvelo, comparando a altitudes de 3 e 10 metros.

Para alcançar os objetivos, a escolha da pesquisa realizada foi de natureza exploratória, abordagem qualitativa, através de um estudo de campo, com a observação simples como instrumento de coleta de dados (GIL, 2008), utilizando o *software Microsoft Excel* para análise e registro dos dados, um anemômetro digital para medir as velocidades do ar no local da possível instalação com 3 metros de altitude e os dados obtidos através da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia, com 10 metros de altitude, de modo a comparar as diferentes condições.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Turbinas eólicas

Desde os primórdios da humanidade, a força do vento é empregada como forma de movimentação de estruturas, sendo empregada principalmente em embarcações e moinhos (CUNHA *et al.*, 2017). As turbinas eólicas para a produção de energia elétrica têm origem pelo professor dinamarquês Poul Lacour e pelo inventor americano Charles F. Brush. Charles construiu o primeiro cata-vento para geração de energia em Cleveland, Ohio, Estados Unidos em 1888, possuindo 144 pás e com a capacidade de produzir 12 *quillowatts* (kW) em corrente contínua (CARDIM *et al.*, 2017).

A TEEH com três pás e gerador de indução é o modelo mais usado nos parques eólicos, por possuir um design e rendimento eficientes (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, [entre 2006 e 2016]). As pás são construídas com fibra de carbono ou fibra de vidro, permitindo leveza e durabilidade. Segundo o Ministério das Minas e Energia ([entre 2006 e 2016]), a capacidade das primeiras turbinas era entre 10 kW e 50 kW, obtendo um aumento no início da década de 90 para 100 kW. Nos dias atuais, a turbina modelo *Haliade X* da companhia GE *Renewable Energy* é a turbina eólica mais potente do mundo, com potência de 12 *megawatts* (MW) (REIS, 2019). Apesar de produzirem uma maior quantidade de energia, as TEEHs têm fatores limitantes, como a altura total da turbina, altas velocidades do vento, a produção de ruído e o impacto em aves migratórias, além dos altos custos de instalação e manutenção. O custo médio de uma turbina eólica convencional é de US \$1 milhão por 1MW (BECKERT, 2017). Com o aumento das dimensões, aumentam os riscos de tombamento do conjunto, sendo de extrema necessidade o emprego de estudos detalhados sobre os esforços que o conjunto pode sofrer (LIMA; YANEZ; SILVA, 2018).

As TEEVs são turbinas com seu eixo posicionado no sentido vertical, sendo meios simples de produzir energia sustentável. Diferente das TEEHs, as TEEVs possuem os benefícios de ter uma baixa manutenção, a capacidade de instalação em diversos locais pelo seu tamanho reduzido, facilidade de construção, por não precisarem de ventos direcionados e por quase não produzir ruído. Apesar dos benefícios, elas são menos eficientes que as TEEHs, tendo 28% menos aproveitamento por não utilizarem a velocidade dos ventos a grandes altitudes (CASTRO *et al.*, 2019).

2.2 Vibrações e vórtices

Segundo Lage (2020) uma vibração é um movimento oscilatório em uma região do espaço em torno do seu centro de equilíbrio. A ressonância é um efeito causado pela coincidência de uma onda com a frequência natural de vibração de um corpo (MARTINS; PINTO; PORTO, 2017), acrescentando energia através de ondas periódicas que podem levar a oscilação a amplitudes crescentes que podem ocasionar na ruptura do corpo. Um grande exemplo é a queda da ponte *Tacoma Narrows*, no Estreito de Tacoma em Washington nos Estados Unidos. A ponte desabou depois de alguns meses de sua inauguração quando sofreu um vento de 65 km/h que causou ondulações e o seu rompimento (RODRIGUES *et al.*, 2017). Esse fenômeno é dominado *lock-in*, ou seja, uma sincronização de frequências (BARROS; HALLAK, 2017). Outro exemplo da formação de vórtices é na extração do petróleo através de tubos para plataformas, onde os tubos com o petróleo estão sujeitos à formação de esteiras pelas correntes marítimas (ARAÚJO; SCHETTINI; SILVESTRINI, 2016), ocasionando em vibrações que reduzem a vida útil dos componentes e podem comprometer as operações.

Essa coincidência de onda com a frequência natural da ponte foi gerada através vórtices de *von Kármán* que se formaram atrás da ponte. Eles possuem esse nome em homenagem ao engenheiro húngaro *Theodore von Kármán*, conhecido como o pai da supersônica (NASA, [entre 2010 e 2020]). Os vórtices são encontrados na esteira de escoamento de fluidos, desprendidos da camada limite da superfície do corpo (BARROS; HALLAK, 2017). Segundo Souza e Oliveira (2016) os vórtices são responsáveis pela força de arrasto que é contrária ao fluxo do fluido.

Vertchenko e Vertchenko (2017) afirmam que a força de arrasto é a resistência de um fluido a passagem de um corpo através dele, ou seja, a combinação da velocidade do

fluido com a frequência natural de um corpo tende a causar movimentos de amplitude cada vez maiores. Esse fenômeno é conhecido como vibração induzida por vórtices (VIV). Pezzi e Petry (2018) definem que quando uma turbina eólica retira a energia do vento, ela deixa à jusante uma região de turbulência onde existem vórtices que impactam na geração das outras turbinas que se encontram na mesma área, diminuindo o potencial eólico do parque.

2.3 Vortex Tacoma

A *Vortex Tacoma* é um modelo de turbina eólica sem hélices que utiliza da vibração gerada pela criação de vórtices de *von Kármán* atrás dela para gerar energia elétrica. Segundo a *Vortex Bladeless (2017)*, o modelo é composto de uma base fixada ao solo e de uma haste móvel de formato cilíndrico que recebe diretamente as cargas de ar. Reis *et al.* (2018) relacionou que a frequência de vibração de uma haste cilíndrica é inversamente proporcional ao quadrado de seu comprimento. Deste modo a forma geométrica da haste permite que ela esteja sempre orientada pelo vento, devido a sua seção transversal circular.

A *Vortex Bladeless (2017)* afirma que o princípio de funcionamento consiste em um alternador composto de bobinas e ímãs que converte a energia mecânica em elétrica através da indução de campo magnético (BORGES; DICKMAN; VERTCHENKO, 2017), de uma forma diferente dos alternadores já conhecidos. Para isso acontecer, um fluxo magnético variável produz uma força eletromotriz induzida, segundo a Lei de Indução Magnética (AZEVEDO *et al.*, 2017). Com base em seus estudos, a *Vortex Bladeless (2017)* afirma que o modelo Tacoma consegue produzir energia a partir de ventos de 3 m/s (metros por segundo), que permitem a instalação em prédios e casas. Com isso, a previsão é que a turbina depois de industrializada possa produzir 100 *watts* de potência nominal, com os benefícios de não utilizar sistemas de engrenagens, ou seja, não necessitar de lubrificação, mínimo de manutenção e produzir quase nenhum ruído. Por ainda estar em fase de testes, o modelo Tacoma não está disponível para venda, mas uma pesquisa realizada pela Beckert (2017) afirma que os custos de instalação de uma turbina eólica doméstica chegam a US \$7.000 por kW de capacidade.

2.4 A energia eólica no Brasil

Os dados do Ministério de Minas e Energia (2019) mostram que as fontes renováveis de energia chegaram a 83,3% da matriz energética brasileira. A energia eólica

passou a ser a segunda colocada, com 15 *gigawatts* (GW) de capacidade instalada, sendo que deste total, 86% estão no Nordeste. Isso comprova que o país pode produzir energia limpa, já que em 2011 a capacidade instalada era de 1GW (ABEEÓLICA, 2019). Segundo Pinto, Martins e Pereira (2017), essa concentração da energia eólica no Nordeste se dá pela forte incidência de ventos na região costeira com médias iguais ou maiores de 7 m/s a 50 metros acima da superfície. O que não implica que possam existir outros meios de se obter energia eólica com altitudes e médias de velocidade de ventos menores, pois segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia, ao final do ano de 2029 o consumo médio residencial será de 200 kWh/mês, referente a um crescimento de 2,2% ao ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018).

2.5 Capacidade eólica de Minas Gerais

As primeiras medições anemométricas em Minas Gerais foram realizadas pela CEMIG em 1960, mas só tendo início da execução do projeto “Estudos sobre aproveitamento de energias Solar e Eólica em Minas Gerais” em 1981 (GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, ([ca. 2010])). O plano possuiu três fases e em duas delas eram responsáveis pelo levantamento dos potenciais eólico e solar. Em 1984 foram inauguradas três estações piloto do serviço de radiocomunicação da CEMIG movidas à energia eólica em Morro do Camelinho na cidade de Gouveia (GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, [entre 2010 e 2020]). Em 1994 a CEMIG foi à primeira concessionária de energia brasileira conectada no sistema elétrico integrado, com a Usina Eólio-Elétrica Experimental Morro do Camelinho (GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, [entre 2010 e 2020]).

A cidade de Curvelo possui altitude da sua sede municipal de 646,41 metros, com unidade de relevo na Depressão do Alto-Médio São Francisco e clima tropical-central, com temperaturas médias maiores que 18 °C em todos os meses (GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, [2017]). Dados do Atlas Energético (GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, ([ca. 2010])) comprovam que a cidade possui em média de 4 a 6 m/s de velocidade do vento a 50 m de altura, sendo inviável a instalação de turbinas eólicas convencionais. Deste modo, para verificar a possibilidade da instalação do modelo *Tacoma*, é necessário à medição da velocidade do vento local através de um anemômetro digital. Sousa e Matos (2016) afirmam que os anemômetros são aparelhos decisivos para definir a capacidade eólica e sua rentabilidade, já que têm a função de ajudar a prever as velocidades médias do vento.

2.6 Anemômetros

Os anemômetros são medidores da velocidade do vento. Funcionam quando a força do vento faz girar suas pás, convertendo essas rotações em pulsos digitais, depois em equações matemáticas e transmitindo através do *display* LCD (ALBUINI *et al.*, 2020). Têm a função de medir as velocidades do ar em tempo real, para que elas possam ser utilizadas em mapeamentos eólicos, levantamento de dados meteorológicos e *softwares* de simulação computacional.

Os *softwares* utilizados em simulação computacional são baseados no método de elementos finitos (MEF), que transforma a geometria do corpo em pequenos pontos que são chamados de elementos, transformando em tarefas mais simples para que um computador possa calcular (MIRLISENNA, 2016).

O número de *Reynolds* (Re) é a razão entre as forças inerciais e viscosas em um movimento (SILVA *et al.*, 2017), sendo de extrema importância em corpos submersos em fluidos como carros, turbinas e aviões por conseguir verificar qual o regime do corpo. Ele pode ser classificado em regime laminar, de transição e turbulento, variando de acordo com o fluido. Diversos estudos comprovam que a turbulência é relacionada com um alto número de *Reynolds* e em seções circulares tendem a desprender os vórtices alternadamente (MALVEIRA *et al.*, 2017). Rodrigues e Padilla (2017) concluíram que o número de *Reynolds* tem papel de extrema importância no escoamento de corpos cilíndricos, por influenciar na dinâmica e aumentar a frequência de desprendimento de vórtices com o aumento do Re .

2.7 Produção de energia

Para calcular a potência gerada pelo aerogerador, é necessário conhecer diversas variáveis. Uma delas que influencia a produção é a densidade do ar. Segundo a CEMIG (2016), as curvas de potência dos aerogeradores são fornecidas com base na densidade do ar considerando o padrão da atmosfera, (15° C, ao nível do mar, que é aproximadamente 1,225 kg/m³), segundo o modelo da ISA – *International Standard Atmosphere*. Para que os resultados se aproximem o mais próximo do real, é necessário refazer o cálculo de densidade conforme a equação 01.

$$\rho = \frac{352,98 \times \left(1 - \frac{z}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + T} \quad (01)$$

Onde:

ρ = Densidade do ar (kg/m³);

z = Altitude (m);

T = Temperatura média (°C).

2.7.1 Potência gerada

A potência gerada pela turbina se dá através do vento captado pela área varrida do rotor. Quanto maior a área do rotor e a velocidade do vento, maior será a produção de energia, pois a potência elétrica permanece em função do cubo da velocidade do vento (CEMIG, 2016), descrita na equação 02.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_r v^3 C_p \eta \quad (02)$$

Onde:

P = Potência (Watts);

ρ = Densidade do ar (kg/m³);

A_r = Área varrida pelo rotor (m²);

v^3 = Velocidade do vento (m/s);

C_p = Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η = Eficiência.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos desse projeto, foi escolhida uma pesquisa de natureza exploratória, já que não existem muitos conteúdos por ser uma tecnologia relativamente nova, com a abordagem qualitativa, para aprofundar o conhecimento, através de um estudo

de campo e utilizando a observação simples como instrumento de coleta de dados. (GIL, 2008). Como ferramentas, deve-se utilizar de um *software* para registro de cálculo dos dados, como por exemplo, o *Microsoft Excel* e um anemômetro digital para medir a velocidade do vento no local da possível instalação.

O anemômetro deve ser posicionado na altura de instalação da turbina, com três metros. As medições serão realizadas durante três horários: 00:00, 12:00 e às 18:00, pelas condições divergentes entre eles. O período de medição deve ocorrer durante os 30 dias do mês de março. Este período foi escolhido, pois ocorre a mudança de estação do verão para o outono, tendo como consequência, a variação também das velocidades do vento, já que as maiores velocidades são registradas no inverno e na primavera (CEMIG, ([ca. 2010])). Os dados referentes à altura de dez metros serão colhidos através da plataforma *online* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que é aberta para consulta pública.

Após realizar as medições e anotações, deve-se realizar o lançamento dos dados no *software Excel*, comparando através de tabelas a diferença dos dados obtidos entre as diferentes alturas estabelecidas.

Depois de comparar os dados, deve-se calcular a relação da velocidade do vento com a produção de energia da turbina, fazer a comparação de preços com a energia de origem hidrelétrica que a residência recebe da concessionária, a comparação de velocidades entre diferentes altitudes, o gasto mensal de energia elétrica, o rendimento da turbina, qual o valor que pode ser reduzido do pagamento da tarifa e a análise de custo benefício.

A coleta dos dados deve ser realizada seguindo a metodologia adotada, com base na análise de conteúdo de Bardin. Com base na estatística descritiva, os dados são decorrentes de observação, então segundo Reis e Reis (2002) deve-se realizar um resumo, ou seja, deverão ser utilizadas as velocidades médias registradas entre os três horários dos dias.

4 ANÁLISE DOS DADOS

4.1 Medidores

Os dados referentes à altura de três metros foram obtidos através das medições com o anemômetro digital na residência. O anemômetro modelo GM816 foi posicionado na

altura especificada durante os horários programados (00:00, 12:00 e 18:00) no local da possível instalação da turbina.

Figura 01 – Anemômetro digital



Fonte: *Shopee*, 2021.

Os dados da estação meteorológica Curvelo 83536 foram obtidos através das medições realizadas pelo INMET e se dão através de um anemógrafo universal, que registra mecanicamente em um diagrama, não só a velocidade média do vento, mas também sua direção e a velocidade instantânea. O anemógrafo se encontra posicionado a 10 metros de altura, seguindo recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Figura 02 – Anemógrafo universal



Fonte: MÜLLER, 2015, p.1.

4.2 Aeroerador

Após a coleta dos dados dos anemômetros, houve a coleta das especificações técnicas do aeroerador *Vortex Tacoma*, conforme o quadro 1 e também sua curva de potência descrita na figura 3.

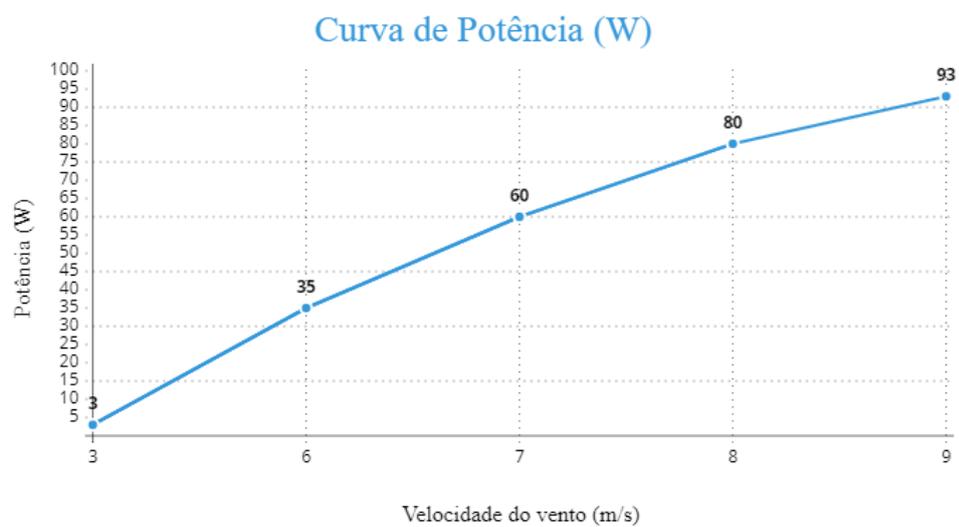
Figura 03 – Especificações técnicas do aeroerador

| | |
|---------------------------------|---------------------|
| Modelo | Vortex Tacoma |
| Altura total | 2,75 m |
| Ângulo Máximo de Amplitude | 2,7 ° |
| Área Varrida | 0,97 m ² |
| Diâmetro Máximo | 0,261 m |
| Frequência de Oscilação Nominal | 7,5 Hz |
| Peso Líquido | 14 Kg |
| Potência Nominal | 100 W |
| Velocidade de Início | 3,0 m/s |
| Velocidade de Corte | 3,5 m/s |
| Vida útil | 18,83 anos |

Fonte: Adaptado de *Vortex Bladeless*

A figura 04 mostra a curva de potência do aeroerador em função da velocidade do vento, considerando a densidade padrão ao nível do mar de 1,225 kg/m³.

Figura 04 – Curva de potência

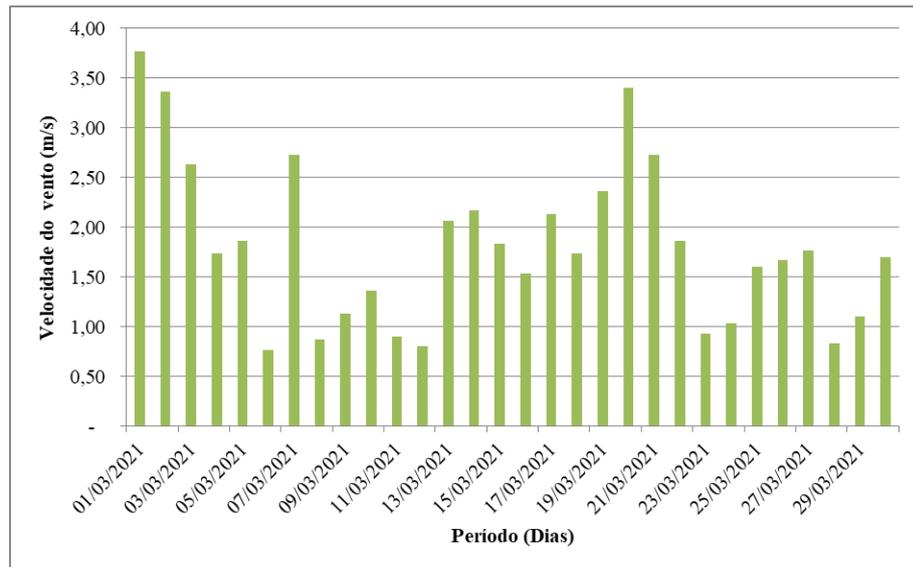


Fonte: Adaptado de *Vortex Bladeless*

4.3 Velocidades de vento

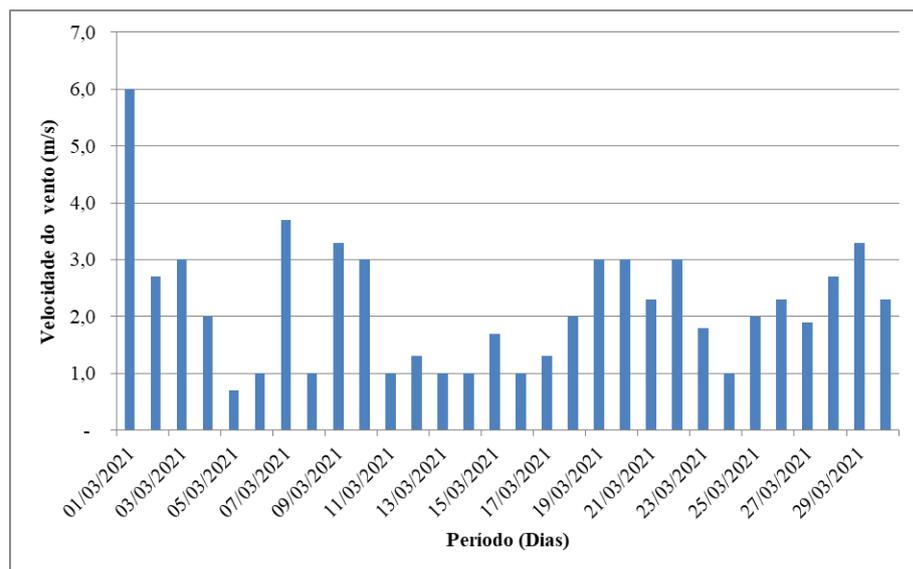
Seguindo a metodologia proposta à figura 05 mostra as velocidades médias de vento registradas na residência na altura de 3 metros, já a figura 06 mostra as velocidades registradas na estação meteorológica na altura de 10 metros.

Figura 05: Velocidades a 3 metros (Residência)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 06: Velocidades a 10 metros (Estação Meteorológica)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Consumo residencial

A residência do estudo possui o consumo médio mensal descrito na figura 07, em conjunto dos valores do quilowatt-hora cobrados pela concessionária de energia responsável.

Figura 07: Consumo Residencial

| Mês | Consumo KWh | Preço KWh |
|--------|-------------|-------------|
| abr/20 | 129 | R\$ 0,94545 |
| mai/20 | 153 | R\$ 0,93638 |
| jun/20 | 118 | R\$ 0,93492 |
| jul/20 | 114 | R\$ 0,93958 |
| ago/20 | 143 | R\$ 0,95937 |
| set/20 | 122 | R\$ 0,94608 |
| out/20 | 148 | R\$ 0,73295 |
| nov/20 | 141 | R\$ 0,73547 |
| dez/20 | 126 | R\$ 0,74642 |
| jan/21 | 145 | R\$ 0,80463 |
| fev/21 | 136 | R\$ 0,75598 |
| mar/21 | 174 | R\$ 0,75329 |

Fonte: Adaptado de CEMIG (2021)

4.5 Resultados

Realizando os cálculos da equação I e II, os seguintes resultados foram obtidos para os dois casos:

Figura 08: Geração de Potência a 3 metros (Residência)

| Data | Velocidade Média do Vento (m/s) | Potência Hora (W) | Potência por dia (Wh) |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 01/03/2021 | 3,77 | 8,78 | 210,61 |
| 02/03/2021 | 3,37 | 6,27 | 150,39 |
| 03/03/2021 | 2,63 | 3,00 | 71,97 |
| 04/03/2021 | 1,73 | 0,86 | 20,52 |
| 05/03/2021 | 1,87 | 1,07 | 25,63 |
| 06/03/2021 | 0,77 | 0,07 | 1,78 |
| 07/03/2021 | 2,73 | 3,35 | 80,48 |
| 08/03/2021 | 0,87 | 0,11 | 2,57 |
| 09/03/2021 | 1,13 | 0,24 | 5,74 |
| 10/03/2021 | 1,37 | 0,42 | 10,06 |
| 11/03/2021 | 0,90 | 0,12 | 2,87 |
| 12/03/2021 | 0,80 | 0,08 | 2,02 |
| 13/03/2021 | 2,07 | 1,45 | 34,79 |
| 14/03/2021 | 2,17 | 1,67 | 40,09 |
| 15/03/2021 | 1,83 | 1,01 | 24,28 |
| 16/03/2021 | 1,53 | 0,59 | 14,21 |
| 17/03/2021 | 2,13 | 1,59 | 38,26 |
| 18/03/2021 | 1,73 | 0,86 | 20,52 |
| 19/03/2021 | 2,37 | 2,18 | 52,24 |
| 20/03/2021 | 3,40 | 6,45 | 154,90 |
| 21/03/2021 | 2,73 | 3,35 | 80,48 |
| 22/03/2021 | 1,87 | 1,07 | 25,63 |
| 23/03/2021 | 0,93 | 0,13 | 3,20 |
| 24/03/2021 | 1,03 | 0,18 | 4,35 |
| 25/03/2021 | 1,60 | 0,67 | 16,14 |
| 26/03/2021 | 1,67 | 0,76 | 18,25 |
| 27/03/2021 | 1,77 | 0,91 | 21,73 |
| 28/03/2021 | 0,83 | 0,10 | 2,28 |
| 29/03/2021 | 1,10 | 0,22 | 5,25 |
| 30/03/2021 | 1,70 | 0,81 | 19,36 |
| Potência Total (Mês) | | | 1160,59 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 09: Geração de Potência a 10 metros (Estação Meteorológica)

| Data | Velocidade Média do Vento (m/s) | Potência Hora (W) | Potência por dia (Wh) |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 01/03/2021 | 6,00 | 35,47 | 851,26 |
| 02/03/2021 | 2,70 | 3,23 | 77,57 |
| 03/03/2021 | 3,00 | 4,43 | 106,41 |
| 04/03/2021 | 2,00 | 1,31 | 31,53 |
| 05/03/2021 | 0,70 | 0,06 | 1,35 |
| 06/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 07/03/2021 | 3,70 | 8,32 | 199,62 |
| 08/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 09/03/2021 | 3,30 | 5,90 | 141,63 |
| 10/03/2021 | 3,00 | 4,43 | 106,41 |
| 11/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 12/03/2021 | 1,30 | 0,36 | 8,66 |
| 13/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 14/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 15/03/2021 | 1,70 | 0,81 | 19,36 |
| 16/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 17/03/2021 | 1,30 | 0,36 | 8,66 |
| 18/03/2021 | 2,00 | 1,31 | 31,53 |
| 19/03/2021 | 3,00 | 4,43 | 106,41 |
| 20/03/2021 | 3,00 | 4,43 | 106,41 |
| 21/03/2021 | 2,30 | 2,00 | 47,95 |
| 22/03/2021 | 3,00 | 4,43 | 106,41 |
| 23/03/2021 | 1,80 | 0,96 | 22,98 |
| 24/03/2021 | 1,00 | 0,16 | 3,94 |
| 25/03/2021 | 2,00 | 1,31 | 31,53 |
| 26/03/2021 | 2,30 | 2,00 | 47,95 |
| 27/03/2021 | 1,90 | 1,13 | 27,03 |
| 28/03/2021 | 2,70 | 3,23 | 77,57 |
| 29/03/2021 | 3,30 | 5,90 | 141,63 |
| 30/03/2021 | 2,30 | 2,00 | 47,95 |
| Potência Total (Mês) | | | 2375,39 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, e redução mensal média no custo da energia elétrica será de:

Na altura de 3 metros: R\$ 0,9855846339

Na altura de 10 metros: R\$ 2,0172049419

Por ainda não existir um preço estabelecido pelo da turbina, não é possível o cálculo exato de sua viabilidade, mas é possível a estipulação se for considerado o custo de US \$7.000 por kW de capacidade. Como a turbina produz 100 *watts* de potência nominal, seu

custo estimado de instalação é de US \$700. Com esse custo e a equação 03, pode se chegar ao tempo que a turbina levaria para cobrir seu custo.

$$T = \frac{(d \times 700) / R_m}{12} \quad (03)$$

Onde:

T = Tempo médio (anos)

d = Cotação atual do dólar;

R_m = Redução média mensal (R\$)

Com a cotação atual do dólar em R\$ 5,08, temos:

Para a altitude de 3 metros: Aproximadamente 300 anos.

Para a altitude de 10 metros: Aproximadamente 147 anos.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, percebe-se que o aerogerador não possui a capacidade para gerar energia suficiente sendo instalado em ambos os locais, devido às condições de baixa velocidade do vento na região nas altitudes medidas. Conforme os resultados das medições, a turbina conseguiria suprir apenas 1% para 3 metros e 2% da energia consumida pela residência.

Como a variação nos resultados entre 3 e 10 metros é mínima, turbina seria capaz de gerar energia eficientemente a 75 metros de altitude, já que as velocidades médias estão em torno de 5 m/s, gerando aproximadamente 14,78 kWh/mês.

Considerando os cálculos de viabilidade, a vida útil da turbina está em torno de 18,83 anos e para que ela possa cobrir seus custos de instalação, levariam cerca de 300 e 147 anos, para as alturas de 3 e 10 metros, respectivamente, tornando-se inviável.

Por ainda estar em desenvolvimento, é possível que futuramente seu rendimento melhore e a sua produção de energia aumente, atingindo os mercados onde as velocidades de vento são baixas, como por exemplo, a região de Curvelo.

6 REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA (Brasil). **Eólica já é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira com 15 GW de capacidade instalada**: Dados de abril de 2019 da ABEEólica mostram que o país já tem mais de 7 mil aerogeradores em 601 parques eólicos. [S. l.], 11 abr. 2019. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/noticias/eolica-ja-e-a-segunda-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira-com-15-gw-de-capacidade-instalada/>. Acesso em: 6 maio 2020.

ALBUINI, Rodolfo Martins; PROENÇA, Filipe de Oliveira; PORTILHO, Guilherme Reis; LUCAS, Victor Hugo Silva; OLIVEIRA, Patrícia Werneck S. de. DESENVOLVIMENTO DE ANEMÔMETRO DE COPOS COM ARDUINO. **Revista Acadêmica Mythos**, [S. l.], ano 2019, v. 12, n. 2, p. 37-47, 2 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.36674/mythos.v12i2.307>.

ARAUJO, L. A. De; SCHETTINI, E. B. C.; SILVESTRINI, J. H. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE SUPRESSORES DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES NO REGIME LAMINAR. **Anais do Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional**, Campina Grande, PB, p. 1-4, 22 jun. 2016. DOI <https://doi.org/10.17648/cbcfd-44535>.

AZEVEDO, Giovani Teixeira de; PEIXOTO, Carlos José Toderó; BARGOS, Fabiano Fernandes; MENEGATTI, Carlos Renato. Gerador trifásico de baixo custo para o ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], ano 2017, v. 39, n. 3, e3503, 6 mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0292>.

BARROS, Gabriel Freguglia; HALLAK, Patricia Habib. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FENÔMENO DE LOCK-IN EM UM CILINDRO EM VIBRAÇÃO LIVRE. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, [S. l.], v. 2, n. 35, p. 87-94, 8 fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.26512/ripe.v2i25.20848>.

BECKERT, Beverly A. A Unique Design Enables Bladeless Wind Turbines to Harness Energy: Computational modeling helps to confirm that an innovative design for a bladeless wind turbine will fly.. *In*: ALTAIR ENGINEERING (EUA). **A Unique Design Enables Bladeless Wind Turbines to Harness Energy**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.altair.com/c2r/ws2017/unique-design-enables-bladeless-wind-turbines-harness-energy>. Acesso em: 25 abr. 2020.

BORGES, Cristiene Chaves; DICKMAN, Adriana Gomes; VERTCHENKO, Lev. Uma aula sobre conversão de energia utilizando bicicleta, motor, alternador e lâmpada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], ano 2018, v. 40, n. 2, e2504, 27 nov. 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0215>.

CARDIM, D. C; SHZU, M. A. M; ÁVILA, S. M; MORAIS, M. V. G. ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO DE PÁ DE TURBINA EÓLICA. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, [S. l.], v. 2, n. 35, p. 280-307, 22 ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.26512/ripe.v2i35.21434>.

CASTRO, Gabriel Gonçalves Pessoa De; OLIVEIRA, Eduardo Ferreira de; VIEIRA, Luís Eduardo Soares; SANTOS, Marcos Moura. Desenvolvimento e construção de um gerador eólico com eixo vertical. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], ano 2019, v. 5, n. 11, p. 27815-27822, 29 nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-375>.

CUNHA, Eduardo Argou Aires; SIQUEIRA, Jair Antonio Cruz; NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo; DINIZ, Anibal Mantovani. ASPECTOS HISTÓRICOS DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S. l.], ano 2019, v. 8, n. 4, p. 689-697. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v8i4.65759>.

FERNANDES, Thiago F. D. Dias; MOREIRA, Nilton L. Uma interface de controle para a Fluidodinâmica Computacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], ano 2019, v. 41, n. 4, p. e20180304, 27 jun. 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0304>.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª. ed. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: <https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2020.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL (Minas Gerais). Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). **ENERGIA EÓLICA**. [S. l.], [entre 2010 e 2020]. Disponível em: https://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Paginas/energia_eolica.aspx. Acesso em: 6 maio 2020.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL (Brasil). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **MONOGRAFIAS MUNICIPAIS DO SUDESTE / MINAS GERAIS: CURVELO**. [S. l.: s. n.], [2017]. 1 Monografia. Disponível em: https://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?http=1&u=biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2972/momun_se_mg_curvelo.pdf. Acesso em: 7 maio 2020.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL (Minas Gerais). Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). **Atlas Eólico: Minas Gerais**. [S. l.: s. n.], [ca. 2010]. 1 Atlas. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas%20eolico%20MG.pdf. Acesso em: 6 maio 2020.

LAGE, Eduardo. Vibrações. **REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR**, [S. l.], p. 1-9, 28 fev. 2020. DOI: <http://doi.org/10.24927/rce2020.015>.

LIMA, Douglas Mateus de; YÁNEZ, Pablo Aníbal López; SILVA, José Weslen Da. Análise da estabilidade elástica em torres tubulares de aço para aerogeradores de eixo horizontal. **Revista de Estrutura de Aço**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 100-119, 1 ago. 2018. DOI: dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-7-2-2.

MALVEIRA, Leandro; KUROKAWA, Fernando Akira; GALLO, Carolina Carreiro; CORRÊA, Laís; NAKAO, Osvaldo Shigueru. INVESTIGAÇÃO DE MODELOS DE TURBULÊNCIA NO ESCOAMENTO DO VENTO EM PONTES. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, [S. l.], ano 2017, v. 2, n. 35, p. 236-256, 22 ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.26512/ripe.v2i35.21431>.

MARTINS, Launelle Cardozo; PINTO, José Francisco Anunciação; PORTO, Thiago Bonjardim. ANÁLISE NUMÉRICA DE VIBRAÇÕES EM UMA PASSARELA MISTA DE AÇO E CONCRETO. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 131-144, 16 maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v13i2.44935>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Decenal de Expansão de Energia: 2029**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>. Acesso em: 5 maio 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético Departamento de Informações e Estudos Energéticos. **Resenha Energética Brasileira: Oferta e Demanda de Energia, Instalações Elétricas, Energia no Mundo..** [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/resenha-energetica-brasileira>. Acesso em: 6 maio 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia Eólica: Tecnologias de Aproveitamento – Turbinas Eólicas.** [S. l.], [entre 2006 e 2016]. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_4.htm#:~:text=Quanto%20%C3%A0%20capacidade%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o,100%20kW%20a%20300%20kW. Acesso em: 24 abr. 2020.

MIRLISENNA, Giuseppe. Método dos Elementos Finitos: o que é?. *In*: INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO(IESSS) (Brasil). **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: O QUE É?**. [S. l.], 22 jan. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 10 maio 2020.

MÜLLER, Alfred. **METEOROLOGISCHE INSTRUMENTE KG: ANEMOGRAFO "UNIVERSAL" 82a.** [S. l.], 2015. p.1. Disponível em: https://documen.site/download/anemografo-universal-82a-rfuess_pdf. Acesso em: 5 maio 2021.

NASA (EUA). California Institute of Technology (Caltech). **Dr. Theodore von Kármán (1881-1963).** [S. l.], [entre 2010 e 2020]. Disponível em: https://www.jpl.nasa.gov/about/bio_vonkarman.php. Acesso em: 12 maio 2020.

PEZZI, Luiz Fernando; PETRY, Adriane Prisco. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO CONSIDERANDO O EFEITO DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS ATRAVÉS DO MODELO DO DISCO ATUADOR. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, RS, ano 2018, p. 1-10, 17 abr. 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/627/627>. Acesso em: 30 abr. 2020.

PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, [S. l.], ano 2017, v. 12, n. 6, p. 1082-1100, 30 nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064>.

RAVEIRO, Glaylson Silva; MATOS, Francisco Frederico dos Santos. ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL. **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus de Maracanaú Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis (PPGER)**, [S. l.], p. 22-27. DOI <https://doi.org/10.21439/conexoes.v10i5.1165>.

REIS , Edna Afonso; REIS , Ilka Afonso. Análise Descritiva de Dados. **Relatório Técnico do Departamento de Estatística da UFMG**, Belo Horizonte, ed. 1ª, 2002. Disponível em: www.est.ufmg.br. Acesso em: 5 maio 2021.

REIS, Pedro. **GE apresenta Haliade X a turbina eólica mais potente do mundo**. [S. l.], 15 ago. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/ge-apresenta-haliade-x-a-turbina-eolica-mais-potente-do-mundo/>. Acesso em: 24 jun. 2020.

REIS, Renan dos; ITO, Pedro Hiroshi Ely; FELICIO, Solano Elias Souza; PAIVA, Fernando Fernandes. Dispositivo para estudo de ressonância e elasticidade em hastes cilíndricas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 40, n. 4, p. e5405, 11 jun. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0074>.

RODRIGUES, Allyson S.; MERGULHÃO, Matheus M. G; OLIVEIRA, Thiago C.; PRIMO, Aislan; MENDONÇA, Maria Anita s. S. De. EFEITOS NÃO LINEARES LIGADOS À QUEDA DA PONTE DE TACOMA NARROWS. **Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 22-35, 15 fev. 2017. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/view/4030>. Acesso em: 27 abr. 2020.

RODRIGUES, Túlio Alves; PADILLA, Elie Luis Martínez. INFLUENCIA DO NUMERO DE REYNOLDS EM ESCOAMENTOS SOBRE UM CILINDRO COM VIBRAÇÃO INDUZIDAS POR VÓRTICES. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, [S. l.], v. 2, n. 26, p. 139-148, 10 fev. 2017. DOI <https://doi.org/10.26512/ripe.v2i26.20832>.

SILVA, Filipe Magalhães de Carvalho; APOLINARIO, Mayara da Fonseca; SIQUEIRA, Antonio Marcos de Oliveira; CANDIAN, André Luiz Moreira; MOREIRA, Livia Andrade Fontes; SARTI, Mateus Rodrigues. EXPERIMENTO DIDÁTICO DE REYNOLDS E CONCEITOS BÁSICOS EM MECÂNICA DOS FLUIDOS. **The Journal of Engineering and Exact Sciences - JCEC**, [S. l.], ano 2017, v. 3, n. 3, p. 346-357, 8 mar. 2017. DOI <https://doi.org/10.18540/jcecv13iss3pp346-357>.

SOUSA, ÍCARO FREIRES; MATOS, FRANCISCO FREDERICO DOS SANTOS. ANÁLISE DA GEOMETRIA DE UM TÚNEL DE VENTO PARA CALIBRAÇÃO DE ANEMÔMETROS. **Conexões Ciência e Tecnologia**, [S. l.], ano 2016, v. 10, n. 5, p. 14-21, 1 dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.21439/conexoes.v10i5.1169>.

SOUZA, Paulo Victor Santos; OLIVEIRA, Paulo Murilo Castro de. Túneis de vento numéricos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], ano 2016, v. 38, n. 2, e2303, 19 abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11173822145>.

THE INTERNACIONAL Standart Atmosphere (ISA). *In*: CAVCAR, Mustafa. **The Internacional Standart Atmosphere (ISA)**. [S. l.], 2000. Disponível em: <http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/praticas/ISAweb.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

VERTCHENKO, Lev; VERTCHENKO, Larissa. Determinação da viscosidade por meio da velocidade terminal: uso da força de arrasto com termo quadrático na velocidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], ano 2017, v. 39, n. 4, e4304, 29 maio 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0041>.

VIPTOOL.BR (China Continental). **Mini Medidor De Velocidade De Vento Digital Lcd Anemômetro Temperatura De Medição Com Claro De Fundo**. 1 dez. 2019. Imagem. Disponível em: [Mini Medidor De Velocidade De Vento Digital Lcd Anemômetro Temperatura De Medição Com Claro De Fundo](#). Acesso em: 5 maio 2021.

VORTEX BLADELESS (Espanha). **How it works: FIRST WIND TURBINE WITHOUT BLADES NOR GEARS**. [S. l.], 31 out. 2017. Disponível em: <https://vortexbladeless.com/technology-design/>. Acesso em: 9 mar. 2020.