MONTAGEM DE BAIXO CUSTO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM MICRO AEROGERADOR USANDO ANEMÔMETRO A LASER

JACILENE MARTINS MEDEIROS*, FERNANDA DE PAIVA*, JOÃO VITOR GOMES DE ARAÚJO*, GABRIEL
ANTUNES*, JADER FERNANDO DIAS BREDÁ*, THIAGO FRANCHI PEREIRA DA SILVA*

**Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Janaúba, MG, Brasil*

Emails: jacilene.martins@ufvjm.edu.br, fernanda.paiva@ufvjm.edu.br,
joao.araujo@ufvjm.edu.br, gabriel.ant95@gmail.com, jader.breda@ufvjm.edu.br,
thiago.franchi@ufvjm.edu.br

Abstract— In Brazil the main energy sources used are hydro and oil, which are not renewable. Due to the scarcity of rain, the reduction of oil wells and the population growth, the country may face a great need for energy rationing, coupled with the constant increase in its tariff. In view of the above, scientists and technology lovers have proposed new sources of energy, capable of minimizing these problems. As in Brazil there is a great solar incidence and few geographical accidents, which contributes to a good occurrence of winds, the use of the wind turbine can be a great alternative. The same can be defined as being an electric generator integrated to the axis of a wind trough, whereby it converts wind energy into electric energy. The purpose of this work is to analyze the characteristic curves of a micro aerogenerator using a laser anemometer with data acquisition via Arduino platform, both developed with materials of low cost of production. By means of this analysis, in the middle of a frequency of 2800 rpm, it was possible to extract the electric energy obtaining an efficiency of 58 %. The reliability of the design is directly related to the quality of the measurements and instruments used.

Keywords— Energy, Aerogenerator, Anemometer, Arduino.

Resumo— No Brasil as principais fontes de energia empregadas são a hídrica e o petróleo, que não são renováveis. Devido a escassez de chuva, a diminuição de poços de petróleo e o crescimento populacional, o país pode passar por uma grande necessidade de racionamento de energia atrelado ao aumento constante da sua tarifa. Diante do exposto, cientistas e amantes da tecnologia, têm proposto novas fontes de energia, capazes de minimizar esses problemas. Como no Brasil há uma grande incidência solar e poucos acidentes geográficos, o que contribui para uma ótima ocorrência de ventos, o uso do aerogerador pode ser uma ótima alternativa. O mesmo pode ser definido como sendo um gerador elétrico integrado ao eixo de um cata vento, pelo qual converte energia eólica em energia elétrica. A finalidade deste trabalho, é analisar as curvas características de um micro aerogerador, usando um anemômetro a laser com aquisição de dados via plataforma Arduino, ambos desenvolvidos com materiais de baixo custo de produção. Por meio dessa análise, em meio a uma frequência de 2800 rpm, foi possível extrair a energia elétrica obtendo uma eficiência de 58 %. A confiabilidade do projeto está diretamente relacionada com a qualidade das medições e dos instrumentos utilizados.

Palavras-chave— Energia, Aerogerador, Anemômetro, Arduino.

1 Introdução

Desde a crise do petróleo em 1973 houve um aumento na busca por novas fontes de energia, e com as mudanças climáticas ocorrendo no mundo inteiro os países começaram a se preocupar com os impactos causados pelas fontes tradicionais (carvão, petróleo e gás natural) (Barcellos, 2014).

Uma das fontes de energia mais utilizadas é a hídrica, mas têm sofrido um grande impacto climático. A mesma vem ocasionando uma grande seca no Brasil, diminuindo o nível de água nas barragens e hidrelétricas do país, causando uma grave escassez de energia. Esta crise levou ao racionamento de energia elétrica (Andrade, 2016).

Uma das medidas tomadas foi incentivar os consumidores a gerar sua própria energia, regularizando o consumidor de ligar a sua geração à rede (Barcellos, 2014). Com o avanço da tecnologia, do design e dos materiais têm ocorrido um aumento no número de instalações dos aerogeradores de pequeno porte (APP) (Rodrigues, 2014).

O ar é um fluido que se move rapidamente na forma de vento. Este movimento resulta na energia cinética que pode ser capturada (Nunes and Manhães, 2010), que está associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme (Castro, 2003).

Os ventos provém de um fenômeno natural, os raios solares aquecem a superfície terrestre que resulta em uma diferença de gradiente de pressão atmosférica, gerando um deslocamento de ar (ANEEL, 2002).

O desenvolvimento da aplicação da energia eólica para geração de eletricidade iniciou-se na Dinamarca em 1980 quando as primeiras turbinas foram fabricadas por pequenas companhias de equipamentos agrícolas (Inácio et al., 2019).

Segundo o boletim de energias da EPE foram gerados 33,15 TWh de energia eólica ao longo de 2016. Em comparação com 2015 a produção de energia dos ventos foi superior em 55 %. Sendo que a geração média de 2016 foi de 3.772,7 MW e o recorde foi em outubro, quando a geração atingiu

a marca média de 4.951,3 MW (ANEEL, 2016).

O período de melhor potencial de energia eólica no Brasil é de junho a dezembro, coincidindo com os meses de menor intensidade de chuvas. Isso coloca o vento como uma grande fonte suplementar à energia gerada por hidrelétricas, a maior fonte de energia elétrica do país (Andrade, 2016).

Porém, a evolução no uso de energia eólica mundialmente é acompanhada pela necessidade de superar problemas relacionados ao seu desempenho e eficiência. Os aerogeradores devem ser avaliados em vários testes diferentes, sendo o International Electric Commission (IEC) o principal órgão de regulamentação dos mais diversos testes existentes para aerogeradores (Rodrigues, 2014).

Para a implementação dos parques eólicos é fundamental realizar projetos que permitem avaliar o potencial eólico. A confiabilidade do projeto está diretamente relacionada com a qualidade das medições e dos instrumentos utilizados (Oliveira et al., 2009).

Na geração de energia eólica se faz necessário a mensuração constante da velocidade do vento, principalmente para analisar a sua direção e assim ter um ótimo rendimento (ANEEL, 2002). Um instrumento tecnológico utilizado para avaliar as condições propícias para a futura instalação de parques eólicos é o anemômetro. Ele é empregado para medir a velocidade de incidência do vento e as direções de propagação, sendo considerado um sistema de monitoramento meteorológico.

No geral, o anemômetro pode ser aplicado em (Silva et al., 2017):

- Energia eólica: caracterização do vento para projetos de centrais eólicas, afim de elaborar atlas eólicos;
- Meteorologia: caracterização climatológica e modelos de propagação de partículas em suspensão;
- Indústria, Aeronáutica e Aerodinâmica: sensores de aeronaves e túneis de vento;
- Áreas afins da Mecânica dos Fluidos: indústrias químicas que utilizam fluidos em seu estado gasoso.

A recolha de dados tem lugar numa estação de medição ou meteorológica. As torres devem ter uma altura suficiente para alcançar o nível mais alto da medição, e superar condições ambientais adversas (Población, 2012).

Desta forma, o trabalho aqui proposto têm como finalidade construir um micro aerogerador em companhia com um anemômetro a laser via plataforma Arduino, ambos desenvolvidos a partir de materiais recicláveis. O seguinte projeto têm como intuito realizar os testes de potência para análise do desempenho do micro aerogerador, assim como suas curvas características.

2 Metodologia

O micro aerogerador pode ser considerado como um equipamento de bancada ou um protótipo, esse por ser o primeiro produto desenvolvido. O protótipo do micro aerogerador foi desenvolvido com um rotor de eixo horizontal com 3 pás, pois sua força de sustentação libera uma maior eficiência que os rotores de eixo vertical.

Para a sua construção foi usado materiais recicláveis. As pás foram feitas de garrafa Pet (poliestireno), o rotor de eixo horizontal foi extraído de um HD usado e os jumpers feitos com fiação de internet. O seu design é visto na Figura 1, onde através dele as pás do micro aerogerador giram produzindo uma energia mecânica, que pôde ser medida através do circuito simples com jumpers acoplados a um multímetro e um amperímetro.

Figura 1: Design do micro aerogerador.

Em princípio, a fonte do vento foi proporcionada por um ventilador de 127 V. O equipamento gera corrente alternada, mas para obter dados mais estáveis os mesmos foram analisados por uma corrente contínua, em que se fez necessário a montagem de um circuito retificador de corrente, pela qual utilizou 1 diodo e 2 capacitores. A Figura 2 mostra a montagem experimental, onde ao variar a resistência os multímetros registram a sua respectiva tensão e corrente.

A posteriori foi desenvolvido um anemômetro a laser com o objetivo de medir a velocidade do vento. Para tal foi desenvolvido um cata vento, em que utilizou-se um pedaço de cano, onde este foi dividido em três partes em que foi moldado em formato curvo, semelhante ao de uma concha, como mostra a Figura 3 (a), também ilustrado na Figura 3 (b) por meio do software AutoCad. Este é utilizado principalmente para a elaboração de peças e desenho técnico em duas e três dimensões.

Para o anemômetro a laser foi usado um secador de cabelo como fonte, assim quando o vento atinge o cata-vento um laser incide sobre as suas

Figura 2: Montagem experimental do micro aerogerador.

(a) Protótipo físico do cata vento.

(b) Protótipo do cata vento no software AutoCad.

Figura 3: Protótipo do cata vento.

pás, alcançando um fotodiodo capaz de absorver o feixe de raios luminosos, onde conectado a um circuito amplificador gera um sinal de pulso para um osciloscópio. O circuito pode ser visto no esquema da Figura 4, pelo PartSim. Este é um simulador de circuitos de fácil manuseio, disponível gratuitamente pelos navegadores.

Figura 4: Esquema do circuito amplificador.

O fotodiodo é um dispositivo semicondutor capaz de variar a resistência elétrica em função da intensidade da luz e ao ser submetido a luz sua resistência diminui abruptamente, conduzindo uma corrente elétrica. Assim para gerar uma frequência de pulso foi integrado ao circuito um duplo amplificador operacional, com oscilação de onda quadrada. O amplificador possui um ganho elevado, possuindo duas entradas, uma inversora negativa e outra não inversora positiva, sendo sua tensão dada pela diferença entre elas. Com o valor da frequência medido no osciloscópio, foi possível descobrir a velocidade do vento. A Figura 5 mostra todo o aparato experimental.

Mas, para ser obtido uma medição da velocidade do vento em tempo real, foi feito a aquisi-

ção de dados por meio da plataforma de desenvolvimento Arduino. O Arduino é uma plataforma open-source de prototipagem, de baixo custo e de fácil manuseio. Ele é composto pelo hardware e o IDE programável que suporta a linguagem C/C++. O Arduino Uno foi escolhido por ser popular e pela quantidade de pinagens. Esse foi integrado ao circuito e ao ser conectado ao notebook, o mesmo foi capaz de receber uma tensão do circuito e transformá-lo em uma saída com frequência e velocidade. Através deste dado de saída foi possível analisar graficamente a frequência e a velocidade do vento.

Figura 5: Aparato experimental completo do anemômetro a laser.

No desenvolvimento foi observado que houve uma perda de potência na conversão para corrente contínua, assim foi necessário aferir um valor mais preciso da potência máxima do aerogerador, por meio da corrente alternada.

Dessa forma foi estudado o micro aerogerador com um circuito de corrente alternada, sem o diodo. Na qual foi utilizado o anemômetro a laser para a medição da velocidade do vento. Onde através do dimensionamento foi determinado o diâmetro do projeto e a velocidade média do vento, obtendo-se a quantidade máxima de energia disponível. Aplicando-se o coeficiente β de Betz encontrou-se a quantidade máxima de energia que o equipamento é capaz de extrair do vento.

A Figura 6 mostra a montagem experimental do micro aerogerador, em (a) pode ser visto o secador de cabelo girando as pás do micro aerogerador e o circuito simples conectado as décadas resistivas e os multímetros. Em (b) mostra o laser incidindo sobre o anemômetro próximo ao micro aerogerador e em posterior incidindo sobre um fotodiodo. Em (c), se têm o circuito amplificador ligado a uma fonte de 8 V e gerando um pulso de onda quadrada em certa frequência.

3 Resultados e Discussões

Uma corrente pode ser designada por contínua quando ela não altera o seu sentido, podendo ser sempre positiva ou negativa. Ao variar a resistência R (Ω) do circuito do micro aerogerador é gerado uma corrente contínua I_c (A). O produto entre a resistência e o quadrado da corrente origina a potência dissipada de um resistor. Ao coletar

(a) Protótipo do micro aerogerador em funcionamento.

(b) Anemômetro a laser em funcionamento.

(c) Circuito e aquisição de dados do micro aerogerador.

Figura 6: Micro aerogerador

os dados de R entre 0Ω e 100Ω e sua respectiva corrente, no multímetro do micro aerogerador, foi obtido o gráfico da Figura 7.

Após refinar os valores tem-se graficamente que a potência máxima gerada é de $1,909.10^{-5} \text{ W}$ com resistência 326Ω , o que é considerável pelo fato do aerogerador não conseguir abranger toda a área de incidência do vento. A potência máxima é o ponto de interseção entre os dois gráficos da Figura 6, ao uni-los.

Na plataforma Arduino foi desenvolvido o código de programação para a aquisição de velocidade do vento. No IDE para a coleta dos pulsos foi adicionado o código de programação abaixo:

```
if (AnalogRead(A0) <= 500 {
    if (pulso) {
        ciclo = ciclo + 1;
    }
    pulso = LOW;
}
if (AnalogRead(A0) >= 600 {
    if (pulso) {
        ciclo = ciclo + 1;
    }
    pulso = HIGH;
}
```

(a) Gráfico 1: Potência x Resistência

(b) Gráfico 2: Corrente x Resistência

Figura 7: Experimento 1

Mediante análise do osciloscópio, obteve uma tensão mínima de $2,64 \text{ V}$ e uma tensão máxima de $3,48 \text{ V}$. Sabendo que a tensão do Arduino é expressa por $1023/5 \text{ V}$, foi desprezado o intervalo entre os dois, encontrando os valores máximos e mínimos por ciclo de rotação do cata vento. Esses valores são dados pelo produto da tensão mínima ou máxima em relação a tensão do Arduino. Assim, foi encontrado os valores de pulso de 500 e 600, onde para leituras analógicas de pulso menores que 500 foi atribuído tensão de 0 V e para maiores que 600 atribui 5 V de tensão.

A velocidade do vento na aquisição de dados pelo Arduino foi dada de acordo com a expressão:

$$v = \omega r = 2\pi f r = \frac{2\pi f r}{3} \quad (1)$$

Em que f é a frequência, r é o raio e a expressão é dividida por 3, por que o cata vento tem três pás, não finalizando uma volta completa. No IDE, o código foi adicionado:

```
if (millis() % periodo == 0) {
    freq = ciclo / 2;
    ciclos = 0;
    v = 2 * 3.14 * 0.05 * freq / 3;
    w = 2 * 3.14 * freq;
    tempo++;
}
```

Onde v é a velocidade do vento em m/s , freq é a frequência em Hz e w é a frequência angular em

rpm. Para a saída dos dados foi usado o comando Serial.print do IDE, na qual imprime os valores.

Para verificar se o osciloscópio e o Arduino registram o mesmo valor foi usado um gerador de funções com vários valores de frequência, na qual em tempo real, o osciloscópio e o arduino registraram o mesmo valor visto na Figura 8, nela todos os instrumentos têm uma frequência de 20 Hz. Assim, pode ser provado o perfeito funcionamento do anemômetro e do código de aquisição, o que é satisfatório.

Figura 8: Teste de validação.

Para a corrente alternada, através de um anemômetro de copos a laser foi medido a velocidade antes e depois do micro aerogerador. Para calcular a energia e a potência gerada foi empregado o modelo do físico alemão Albert Betz, que considera um sistema com pás, como mostra a Figura 9 (Dutra, n.d.).

Figura 9: Sistema de pás considerando perdas de velocidade. Fonte: Dutra, 2018.

As expressões do modelo de Betz são dadas por :

- Em que a potência do vento é dada pela por,

$$P = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}A\rho v^3 = \frac{1}{2}\pi\frac{d^2}{4}\rho v^3 \quad (2)$$

- A energia cinética extraída do micro aerogerador é,

$$Ec = \frac{mv - \frac{1}{2}mv^2}{2} = \frac{1}{2}A\rho v_2(v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2}\rho A \frac{(v_1 + v_3)}{2}(v_1^2 - v_3^2) \quad (3)$$

- A eficiência é dada pela equação,

$$Ef = \frac{P_{til}}{P_{total}} = \frac{1}{2}[1 + \frac{v_3}{v_2}][1 - \frac{v_3^2}{v_1^2}] \quad (4)$$

- A frequência de rotação é,

$$f = \frac{W}{\pi} = \frac{\lambda v}{2\pi} = \frac{30\lambda v}{\pi} \quad (5)$$

Onde m é massa do ar, v é a velocidade do vento, A é a área superficial, ρ é a densidade, v_1 é a velocidade de entrada, v_2 do aerogerador, v_3 a de saída, λ é um indicador que relaciona a velocidade da ponta da pá com a velocidade do ambiente e r é o raio do rotor.

O micro aerogerador foi posto a uma altura de 0,3 m e uma distância de 0,4 m em relação a fonte de vento, o diâmetro do motor foi de 0,032 m e o da fonte de vento de 0,043 m e o tamanho das pás foi de 0,106 m. Após a montagem, foi obtido os valores da corrente, tensão e potência, e por meio destes valores foi desenvolvido os gráficos da Figura 11.

(a) Gráfico 1: Potência x Resistência

(b) Gráfico 2: Corrente x Resistência

Figura 10: Valores da tensão v em Volts(V), corrente i em Ampère(A) e potência P em Watts(W).

Através de um anemômetro de copos a laser as velocidades v_1 e v_2 foram de 1,34 m/s e 0,41 m/s, respectivamente. E com esses dados foi aplicado o método de Betz, onde foi obtido uma potência de vento de $8,84 \cdot 10^{-4}$ W, uma energia cinética de $6,98 \cdot 10^{-4}$ J, uma eficiência de 58 % e uma frequência de rotação de 2800,57 rpm. Apesar de serem obtidos valores pequenos de potência e energia, o que pode ser devido ao tipo de fonte de incidência

do vento, o resultado foi satisfatório pois a eficiência superou todas expectativas.

4 Conclusões

Em análise de teste os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que foi possível desenvolver o micro aerogerador e o anemômetro a laser, com materiais recicláveis e obter suas curvas característica. Com análise das curvas foi possível determinar a máxima potência gerada em função da carga e assim a energia coletada pelo protótipo do micro aerogerador pôde ser convertida em energia elétrica. E nesta análise foi obtido a velocidade do vento onde pode-se calcular a eficiência da energia gerada que foi no valor de 58 %, um valor satisfatório, tendo em vista que a fonte de ar é um secador de cabelo.

Agradecimentos

Agradecemos a todos os professores da UFVJM Campus Janaúba e ao técnico do Laboratório de Física, o engenheiro eletricitista Rossini Leite de Oliveira, por ter nos proporcionado um apoio e suporte incondicional.

Referências

- Andrade, D. G. (2016). A produção da energia elétrica na matriz energética brasileira., *Rio de Janeiro* .
- ANEEL (2002). Atlas de energia elétrica do brasil, *Agência Nacional de Energia elétrica do Brasil* .
- ANEEL (2016). *Boletim Anual de Geração Eólica*, Brasília.
- Barcellos, S. N. (2014). Avaliação de potencial eólico para aerogeradores de pequeno porte, *Universidade do Espírito Santo. Vitória* .
- Castro, R. M. G. (2003). Energias renováveis e produção descentralizada: Introdução À energia eólica, *Universidade Técnica de Lisboa* .
- Dutra, R. (n.d.). Energia eólica: Principios e tecnologias (centro de referência para energia solar e eólica sérgio de salvo brito, rio de janeiro, 2008), *Disponível em http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf* .
- Inácio, A. R., Oliveira, M. C. D. S., Borges, D. D. S., De Oliveira, J. L., Ayres, L. A. A. and Da Silva, K. D. C. (2019). O aproveitamento da energia eólica, *Revista de Iniciação Científica da Universidade Vale do Rio Verde* 8(2).
- Nunes, G. d. A. and Manhães, A. A. (2010). Energia eólica no brasil: uma alternativa inteligente frente às demandas elétricas atuais, *Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense* 1: 163–167.
- Oliveira, C. P. d., Miyamoto, M. M. T., Izquierdo, R. C. and Simioni, Gabriel Cirilo da Silva, A. J. A. V. (2009). Procedimentos de ensaios de anemômetro de copo, *X Salão de Iniciação Científica PUCRS* .
- Población, E. A. (2012). Influência das estruturas de suporte dos sensores nas medições da velocidade do vento propostas de correções às séries, *Universidade do Porto* .
- Rodrigues, R. V. (2014). Simulação do desempenho de aerogeradores de pequeno porte, *Universidade Estadual de Campinas* .
- Silva, G. R., Teixeira, B. and Lopes, P. E. (2017). Anemometria. medição do vento para desenvolvimento de projetos eólicos., *Braselco, energias que transformam o futuro* .