

Estudo da viabilidade técnica de implantação de aerogerador de pequeno porte de energia elétrica renovável no Estado de Alagoas

Luiz André da Silva Lima*, Valéria Loureiro da Silva

Faculdade SENAI CIMATEC. Av. Orlando Gomes, 1845. Piatã. Salvador-BA (CEP 41650-010). E-mail: andre.lima@al.senai.br.

Resumo. O presente trabalho descreve a análise dos parâmetros das características eficiência de faixa de regime de trabalho de um aerogerador de pequeno porte do modelo ISTA-BREEZE 500, de fabricação turca, eólico, que inicialmente gera entre 400 a 500 W e tensão de saída 24 v, peso 2,5 kg, na cor branca, velocidade de passo de 2,5 m/s. A partir destas informações foi desenvolvido um estudo de viabilidade técnica de um aerogerador de pequeno porte de energia elétrica. Os resultados obtidos foram realizados em uma bancada na qual tiveram dados satisfatórios nos três testes apresentados. Foram realizados os teste de tensões de saída do aerogerador em circuito aberto, medição em curto-circuito e verificação de curva de potência. O laboratório do Centro de Formação Profissional Gustavo Paiva (CFP-GP), SENAI, Maceió-AL, Brasil, foi o local de teste. A bancada mostrou ser apropriada para estes tipos de testes, podendo ser utilizada para analisar a viabilidade técnica de implantação de aerogerador de pequeno porte de energia elétrica renovável.

Palavras-chaves: Aerogerador; Fonte alternativa; Fontes renováveis de energia; Energia eólica.

Abstract. *Study of the technical feasibility of implementation of aircraft of small energy renewable energy.* The present work describes the analysis of the parameters of the efficiency characteristic of the operating range of a small wind turbine of the ISTA-BREEZE 500 of Turkish, wind turbine manufacturing, that initially generates 400 to 500 W and output voltage 24 v, weight 2.5 kg, white, stall velocity 2.5 m/s. From this information was developed a technical feasibility study of a small electric power generator. The results were obtained in a bench, in which they had satisfactory data in the three tests presented. The open-circuit aerogenerator output voltages test, short-circuit measurement and power curve verification were performed. The laboratory of the Gustavo Paiva Vocational Training Center (CFP-GP), SENAI, at Maceió-AL, Brazil, was the test site. The workbench proved to be appropriate for these types of tests and could be used to analyze the technical viability of small wind turbine implantation.

Keywords: Wind turbine; Alternative source; Renewable sources of energy; Wind energy.

Recebido:

29/10/2016

Aceito:

27/12/2016

Publicado:

31/12/2016



Acesso Aberto
Artigo completo



ORCID

0000-0001-6558-2425

Luiz André da Silva
Lima

0000-0001-5466-7933

Valéria Loureiro da
Silva

Introdução

Uma das primeiras estratégias empregadas pelo homem para utilizar a força dos ventos foi através dos barcos à vela. Com a utilização dos moinhos de grãos e aparatos de bombeamento de água, o objetivo era diminuir todos os esforços físicos. O primeiro moinho de vento foi movido pela força humana. Escravos e também alguns animais eram usados para fazê-lo girar em círculos. Os moinhos em poste ou pilastra, os seus mancais, eram parte do capitel (parte superior) que segurava as lâminas. Os trabalhadores tiveram que direcionar sua máquina de vento até a invenção da ventoinha. Após o ano de 1750, o sistema ficou automático, direcionado e acionado pelo próprio vento (Martins et al., 2008). Os primeiros moinhos de vento eram de eixo vertical, como o mostrado na Figura 1a, e depois de eixo horizontal (Matos, 2009), como na Figura 1b.



Figura 1 a

Figura 1 b

Figura 1. Moinho de vento de eixo vertical (a) e horizontal (b).

As principais fontes de energia (FE) não renováveis no Brasil são aquelas que com o tempo poderão se esgotar, como energia do carvão, energia do petróleo, energia do gás natural e energia do urânio. Uma das mais utilizadas, entre as não renováveis, é a termoelétrica, que vem

sendo aproveitadas para suprir a necessidade de energia adicional no país. Ela também não é suficiente, precisando de outros tipos de fontes para suprir a necessidade do Brasil. As renováveis são as energias das ondas e marés, energia solar, energia hidráulica, que é a mais utilizada no Brasil, e energia eólica (Reis e Lineu Belico, 2015).

A energia eólica utiliza a força dos ventos para virar as hélices para a geração de energia. Ela vem crescendo a cada ano, podendo ser considerada uma das promissoras fontes de energia natural no nosso país.

Os aerogeradores de pequeno porte (APP) estão nas recentes transformações do setor de geração, tributo promovido pela Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) do governo federal tem o objetivo de aumentar a participação da FE produzida por empreendimentos com base na energia eólica (FE), biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) (Salino, 2011).

O intuito do PROINFA é promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira como fonte alternativa de aumento com segurança do abastecimento de energia elétrica, valorizando potencialidades regionais e locais do território nacional (NEOENERGIA, 2009).

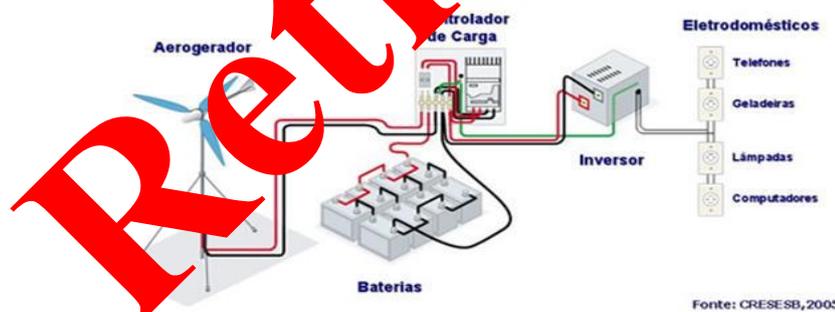
No Brasil, algumas normas da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) sobre EE foram traduzidas e denominadas NBR IEC 61400-1, NBR IEC 61400-12-1. A IEC 61400-2 refere-se a aerogeradores de pequeno porte. O mercado de aerogeradores de grande porte tem se tornado significativo, principalmente em função dos leilões de energia de reserva e de FE renováveis. Todavia, a comercialização no mercado de APP no país não tem muita procura no mercado brasileiro, é praticamente inexistente, uma vez que a geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente centralizada (Vieira, 2013).

Tabela 1. Fabricantes de aerogeradores de pequeno porte.

Fabricante / modelo do aerogerador	Tensão de saída	Potência (W)	rpm / m/s	Outras característica	Valor do aerogerador (R\$)
Enersud LTDA / Notus 138	12/24/48 Sistema Trifásico	250 - 350	1.100 / (3 -12 m/s)	Números de pás: 5 Tipo de pás: torcida Alternador: fluxo axial	3.500,00
Eletrovento / Turbo 500	12V / Sistema Trifásico	400 - 500	600 -1000 / (3 -12m/s)	Números de pás: 3	2.867,39
ISTA BREEZE / 500 24 v	24 v	400 - 500	650 - 3000 / 12 m/s	Números de pás: 3	1.650,00

A Figura 2 mostra esquematicamente um sistema isolado de geração de energia eólica. Consiste de um controlador de carga que monitora a carga gerada pelo aerogerador e a armazena nas baterias, onde sua principal função é bloquear a corrente reversa e prevenir a sobrecarga das baterias, prevenir o excesso de descarga e sinalizar o estado da bateria e fluxo de carga através de mostrador (Matos, 2009).

O aerogerador gera corrente alternado (CA) e alimenta as baterias que armazenam a energia gerada para uso posterior. Como as baterias fornecem corrente contínua (CC/DC), é necessária a utilização de um inversor para alimentação dos equipamentos funcionais que requerem corrente alternada em 220/127V - 60Hz (Braz, 2013).

**Figura 2.** Configuração de um sistema eólico isolado mostrando o aerogerador, controlador de carga, bateria e inversor.

Este trabalho propõe analisar um aerogerador existente em uma bancada e, a partir desta análise, desenvolver um estudo de viabilidade técnica de um APP de energia elétrica para regiões do nordeste, especificamente no estado de Alagoas. De acordo com o atlas Eólico, foi feita uma análise mostrando que o Estado de Alagoas

tem um considerável potencial eólico. A região mais propícia do estado seria o agreste, em seguida do sertão. O objetivo do trabalho é fazer um levantamento do gráfico de desempenho de um AEPP em uma bancada. Podemos testar vários AEPP permitindo fazer a comparação dos resultados práticos com os resultados

teóricos feitos com a do fabricante (Ferreira Junior e Rodrigues, 2015).

Metodologia

Para avaliar a viabilidade técnica de utilizar um aerogerador eólico de pequeno porte (AEPP), foi montada uma bancada de testes, conforme a Figura 3.



Figura 3. Módulo eólico com simulador.

Equipamento da Bancada de Teste

Teste

A bancada é composta por um inversor de frequência (1), motor elétrico (2), torquímetro (3), aerogerador (4), multímetro (5), retificador trifásico (6), controlador do aerogerador (7), inversor ou conversor de tensão DC/AC (8), duas baterias estacionárias de 45Ah/12Vcc ligada em série (9), e um (10). A Figura 4 mostra o esquema de funcionamento da bancada.

Aerogerador estudado

O aerogerador que foi utilizado é do fabricante ISTA-BREEZE modelo 500, de fabricação turca, eólico, que inicialmente gera 400 a 500 W e tensão de saída 24V, peso 2,5 kg, na cor branca, velocidade de partida de 2,5m/s, sua velocidade média mensal do vento a 5,4m/s (19,44 km/h): 150 kwh/mês. Sua estrutura externa é feita de Resina de Poliéster Termoplástico Crastin® PBT, reforçado com 30% de fibra de vidro, as lâminas do rotor e o invólucro são altamente duráveis. O contato livre de

manutenção, deslizante (sem carbono), garante um bom fluxo de corrente e, portanto, nenhuma torção do cabo no mastro. Outras características técnicas posteriores na descrição. Conforme a Figura 5.

Teste analisados no Aerogerador

Todos os testes para analisar os parâmetros do aerogerador de pequeno porte foram realizados na bancada, dentro do laboratório do Centro de Formação Profissional Gustavo Paiva (CFP-GP) SENAI, na Rua Pedro Américo, nº. 18, Poço, Maceió – Alagoas. Para simular as condições reais do vento, foi utilizado um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor trifásico síncrono de 1CV e com 1800 RPM, e o motor acoplado diretamente ao eixo do aerogerador que será testado, conforme a Figura 4. No eixo do aerogerador foi conectado um torquímetro para fazer a medição do torque no mesmo. Ao mesmo tempo, foi conectado um instrumento de medição como o multímetro e olicate amperímetro para fazer as medições de tensão e corrente por cada fase do aerogerador, em várias situações, tais como:

- Tensões de saída do aerogerador em circuito aberto;
- Medição em curto-circuito;
- Verificação de curva de potência segundo IEC 61400-12-1;

Procedimento de medição do instrumento

Para fazer o primeiro teste, em circuito aberto, foi utilizado o aerogerador descrito no item [2.2]. Sua medição foi feita na saída do aerogerador, dada em tensão CA, constituídas de três bobinas com defasagem angular de 120°. Como ele tem três fases, fase A, B e C, medimos entre a fase A e B, depois entre A e C, e, em seguida B e C. Essa tensão foi medida nos terminais de saída do aerogerador e chamada de tensão de linha.

Foi acoplado no seu eixo um tacômetro, que é um equipamento utilizado para medir rotação do motor. A curva também foi construída através da TENSÃO

versus RPM e calculada com os dados de tensão e RPM medidos durante a operação do aerogerador. Com a análise, foi mostrado que para quando aumentava o valor do RPM, os valores de tensão do terminais de saída do aerogeradores foram aumentados e tinha perda mecânica, para fazer a medição do circuito aberto.

As medições em curto-circuito foram coletadas através de simulação na bancada, colocando o multímetro na escala

de corrente em cada fase, na A,B e C, nas saída dos terminais do aerogerador as fase foram conectados entre si, fechando um curto-circuito. Foram feitas as medições de corrente e o torque para cada faixa de velocidade. O equipamento utilizado para medir a rotação do motor é o tacômetro, conforme Figura 4.



Figura 4. Esquema do equipamento da bancada.



Figura 5. Aerogerador.

Para fazer a medição do curto-circuito, também temos de falar de reatância indutiva X_L , que é a oposição à corrente alternada devido à indutância do circuito. Sua unidade é o ohm, ou capacitância do circuito elétrico. A Equação (1) demonstra a reatância (X_s), mostra a tensão de fase a circuito aberto (E_{ca}), a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a resistência de armadura do gerador (R_a).

$$X_s = \sqrt{(E_{ca}/I_{cc})^2 - R_a^2} \quad (1)$$

Para medir a curva de potência e para realizar as medições de valor da potencia foi feita a medição de corrente, tensão de saída dos terminais do aerogerador e torque.

Estudo do potência do vento em função da velocidade do vento

Para fazer a simulação da velocidade do vento, os experimentos foram feitos na bancadas, utilizando velocidade inicial de 1 RPM em ordem crescente até 1.150 RPM. Para poder avaliar qual seria seu valor de tensão, corrente e potência, foi colocado um valor de rotação e verificado os valores de todas as grandezas citadas, para a construção da Figura 6 que mostra o ensaio do circuito aberto, Já para a Figura 7 e 8, os valores de rotação foram menores de 1 RPM até 900 RPM. Na Figura 7, o teste era para simular um curto-circuito entre as fases, e, na simulação da Figura 8, da curva de potência do aerogerador. Para geração de cada potência, foi colocado um valor de RPM. Através da simulação do aerogerador mostramos um resumo dos resultados, os dados coletados foram colocados em uma planilha do Excel, comparando com dados extraídos do catálogo do fabricante para avaliar a viabilidade do mesmo.

Com os dados obtidos, podemos prever o desempenho de equipamento em outros locais em que o mesmo possa ser instalado. Vamos pensar se o litoral da região nordeste do estado de Alagoas é realmente viável. Como sua velocidade média do vento é de ordem de 4m/s a 10m de altura, vamos analisar a viabilidade da tecnologia eólica de pequeno porte “no Estado de Alagoas” (Costa, 2009).

Para calcular o potencial do vento ou potência eólica, temos que saber os valores da velocidade do vento, conforme a Fórmula 2.

$$P_{\text{vento}} = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_{\text{vento}}^3 \text{ Watts} \quad (2)$$

Onde:

P é a potência do vento (Watt);

ρ é a densidade do ar ($\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$);

A área das pás (m^2), (πR^2);

V_{vento} é a velocidade do vento incidente na turbina eólica (m/s).

Para calcular a potência elétrica do aerogerador do vento ou potência eólica, temos que saber os valores da velocidade do vento, conforme a fórmula 3.

$$P_{\text{el}} = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_{\text{vento}}^3 \quad (3)$$

Onde:

P é a potência do vento (Watt);

ρ é a densidade do ar ($\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$);

A área das pás (m^2), (πR^2);

V_{vento} é a velocidade do vento incidente na turbina eólica (m/s).

C_p é o coeficiente de potência.

V_t é a velocidade do vento incidente na turbina eólica (m/s).

Determinação da energia convertida por um aerogerador

Para calcular o intervalo de tempo durante o qual cada velocidade do vento ocorreu, é só multiplicar a função densidade de probabilidade de Weibull pelo número de horas do período considerado (Lopes e Almeida, 2003).

$$N(x) = f(V) \cdot t \quad (4)$$

Onde:

N(x) é o intervalo de tempo durante o qual cada velocidade do vento ocorreu;

f(V) é a função densidade de probabilidade de Weibull;

t é o número de horas do período considerado.

Cada fabricante de aerogerador fornece sua própria curva de potência e a curva da energia convertida em função da velocidade do vento $P(V)$. Para saber qual é a curva da energia convertida pelo aerogerador é realizada a multiplicação da função densidade de probabilidade pelo número de horas do período considerado e pela curva de potência do aerogerador em análise, conforme a Fórmula 5 (Vale, 2000).

$$E(V) = f(V).t.P(V) \quad (5)$$

$E(V)$ é curva da energia convertida pelo aerogerador como uma função da velocidade do vento para certo período;

$f(V)$ é a função densidade de probabilidade de Weibull;

t é o número de horas do período considerado;

$P(V)$ é a curva de potência do aerogerador em análise.

A curva de potência poderá, ainda, ser determinada de forma experimental utilizando instrumento de medida, como o wattímetro, ou calculados através da Fórmula 5, ou utilizando-se um multímetro na escala de tensão e também o amperímetro para medir a corrente. Assim, teremos a potência obtida através de medições na saída de potência do gerador eólico.

$$P = V.i.\cos\phi \quad (5)$$

Onde:

P é a potência calculada (em watt);

V é a tensão medida (em volt);

i é a corrente medida (em ampère);

ϕ é o ângulo de fase entre a tensão e a corrente.

Resultados e discussão

Medição em circuito aberto

Os dados da Figura 6 mostram que a tensão gerada é diretamente proporcional à rotação, no entanto, a velocidade aumenta e a tensão também aumenta.

Podemos notar que quando aumenta a velocidade do vento, também o seu valor de tensão é aumentado.

Medição em curto-circuito

A curva curto-circuito também foi construída através da Fórmula 1, corrente versus RPM e medidos durante a operação do aerogerador, conforme Figura 7.

Os dados mostram que quanto maior for a rotação, maior vai ser sua corrente gerada, conforme mostra a Figura 7.

Verificação de curva de potência

A curva de potência também foi construída através dos cálculos de tensão e corrente conforme a Fórmula 5, para geração da Figura 8, potência calculada a partir da multiplicação da curva de potência gerada em diversas rotações com os dados medidos durante a operação do aerogerador.

A Figura 8 mostra uma curva de potência construída através da potência calculada a partir da multiplicação dos dados de tensão x corrente obtidos em medições da Figura 7, e da velocidade do vento (RPM). Pode-se perceber, através do gráfico, que a relação entre potência e rotação são quase lineares. A curva gerada é muito semelhante à curva da tensão em função da velocidade do vento, visto que a tensão permanece praticamente constante. Com ajuda da bancada, podemos simular a ação do vento através da rotação do motor elétrico.

A incerteza para os valores calculados foi determinada, e a sua influência sobre os resultados é bastante pequena (da ordem de mW).

A Figura 9 mostra as curvas que expressam a corrente convertida segundo o fabricante (calculada através dos dados medidos). Através destas curvas, pode-se observar que os valores de potência fornecidos pela curva do fabricante são bem próximos dos valores de potência verificados na prática para as mesmas velocidades do vento.

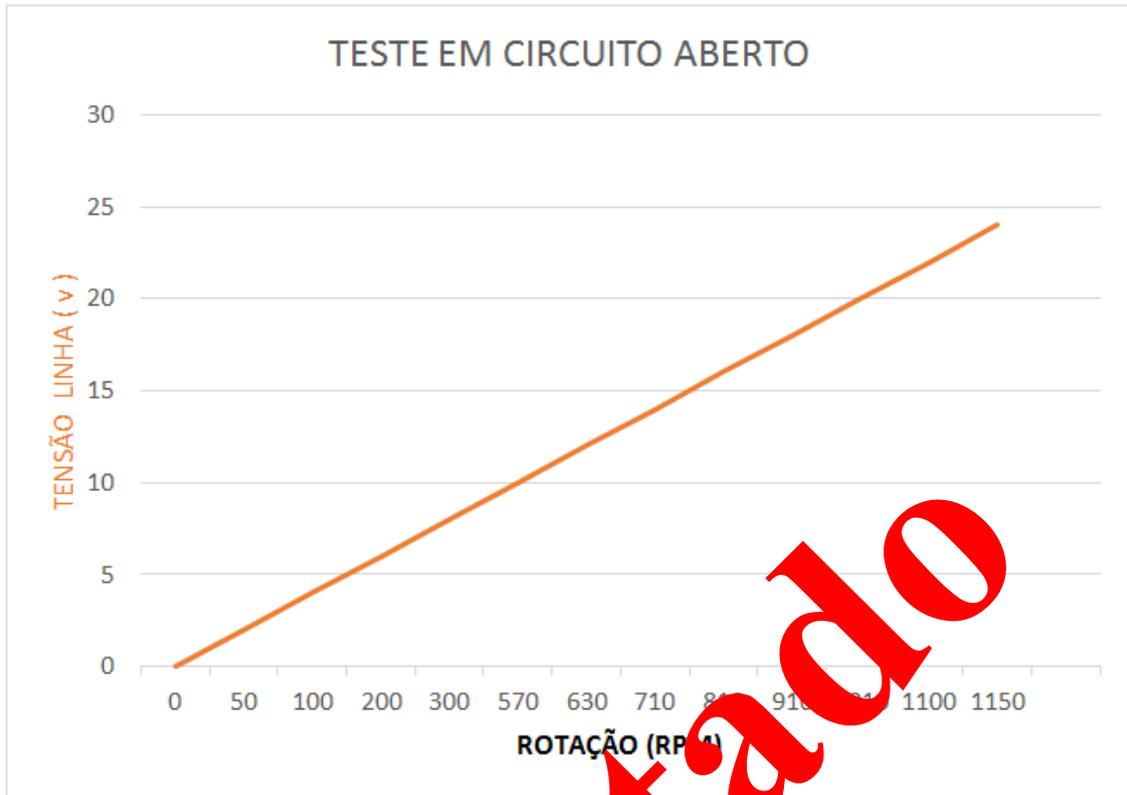


Figura 6. Resultados de tensão foi entre a fase A e B, como exemplo, com circuito aberto versus rotação.

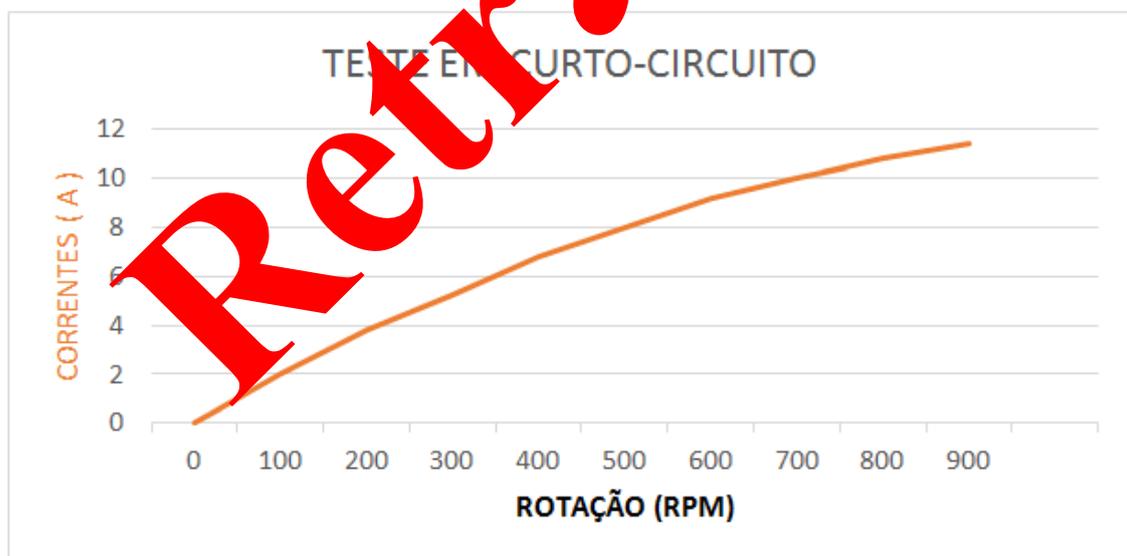


Figura 7. Resultados de corrente em curto-circuito, corrente versus rotação.

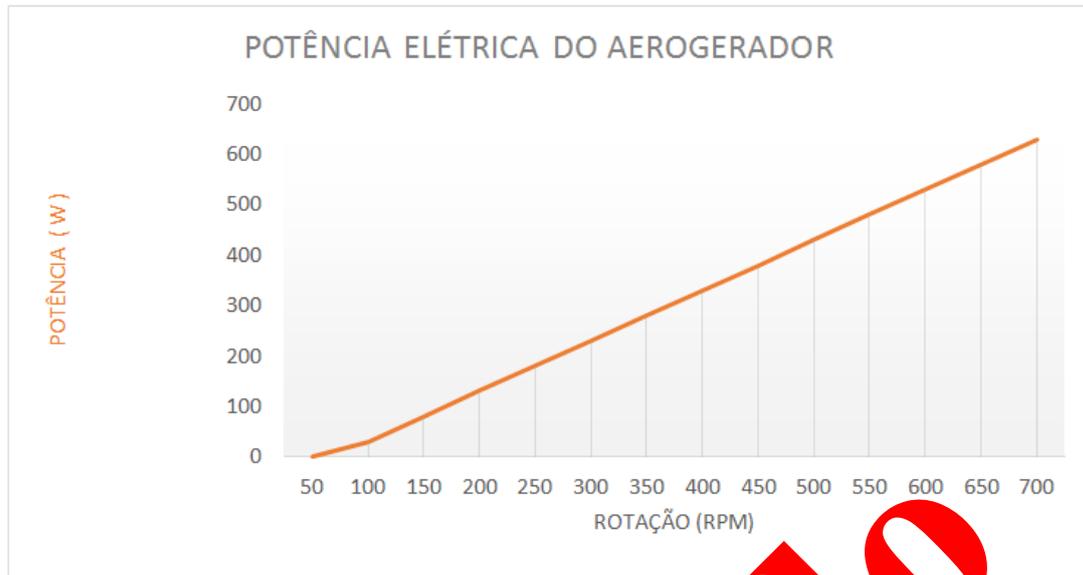


Figura 8. Dados da curva da potência característica do aerogerador citado. Fonte: autores.



Figura 9. Dados da curva da corrente do aerogerador. Fonte: Altinel Energy Turquia - Fabricante.

Conclusão

Os resultados obtidos foram realizados em uma bancada, na qual foram levantados dados através dos três testes apresentados: tensões de saída do aerogerador em circuito aberto; medição de corrente em curto-circuito e verificação de curva de potência segundo IEC 61400-12-1;

especificamente para um aerogerador de pequeno porte. Desse modo, a partir dos testes, temos parâmetros suficientes para analisar as características que os fabricantes informarem em seus manuais, podendo utilizar qualquer tipo de aerogerador de pequeno porte para analisar a viabilidade técnica de sua implantação no sistema de energia elétrica renovável.

Declaração de conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesses.

Referências

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

Brum, T. S. **Projeto de uso de energia fotovoltaica como fonte emergencial**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. (Trabalho de conclusão de curso de graduação). Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/mopoli10006178.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2016.

Costa, G. B. **Análise espacial e temporal do vento no Estado de Alagoas**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2009. (Dissertação de mestrado).

Costa, G. B.; Lyra, R. F. F. Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 31-38, 2012.

Ferreira Junior, J. C. G.; Rodrigues, M. G. Um estudo sobre a energia eólica no Brasil. **Revista Atual**, v. 5, n. 1, p. 2-13, 2015. Disponível em: <<http://inseer.ibict.br/cafsj/index.php/cafsj/article/view/100/pdf>>. Acesso em: 28 out. 2016.

Lopes, T. M.; Almeida, J. A. Análise de dados da velocidade e do potencial eólico na Cidade do Rio Grande. Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2003. (CD-rom).

Martins, F. R.; Guarnieri, R. A.; Pereira, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Rev. Brasil. Ens. Fís.**, v. 30, n. 1, p. 1304-1-1314-13, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172008000100005>

Matos, M. B. **Investimentos financeiros em células a combustível e hidrogênio no Brasil**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. (Dissertação de mestrado).

Neoenergia. **Geração de Energia no Brasil**. 2009. Disponível em: <<http://www.neoenergia.com/section/geracao.as.p>>. Acesso em: 28 out. 2016.

Pessoa Júnior, O. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. **Scientiae Studia**, v. 8, n. 2, p. 195-212, 2010.

Picolo, A. P.; Ziller, A.; Raminelli, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 4306-1-4306-13, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-1117201400010007>

Salinas, L. **Geração de energia elétrica**. Belém: Manole, 2015.

Salinas, L. J. **Energia eólica no Brasil: uma comparação do PROINFA e dos novos leilões**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. (Trabalho de conclusão de curso de graduação).

Vieira, J. C. S. F. **Planejamento de cenários adotando a metodologia Shell no setor de energia elétrica: visualizações da geração distribuída no Brasil**. 2013.