

Avaliação do desempenho de um aerogerador de pequeno porte

Evaluation of the performance of a small wind turbine

Evaluación del rendimiento de un pequeño aerogenerador

Recebido: 09/03/2022 | Revisado: 17/03/2022 | Aceito: 22/03/2022 | Publicado: 28/03/2022

Davi José De Grandi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7378-8036>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: de.grandi@outlook.com

Jair Antonio Cruz Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8140-444X>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: jair.siqueira@unioeste.br

Carlos Bohn

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8099-126X>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: bohncarlos@yahoo.com

Luciene Kazue Tokura

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9758-0141>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: lucienetokura@gmail.com

Resumo

Este trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade econômica de geração de energia eólica na área urbana de Cascavel – PR, com a finalidade de atender a demanda de uma residência unifamiliar. O experimento foi realizado por meio da coleta e análise de dados de desempenho de uma turbina eólica de pequeno porte da marca Greatwatt, modelo S-600, instalada no Centro de Análise de Sistemas Alternativos (CASA), do campus de Cascavel da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Para isso, as informações de produção de energia elétrica da turbina e da energia eólica disponível foram obtidas em ensaio de campo, medindo os valores de velocidade de vento, tensão e corrente elétrica fornecida pela turbina eólica para um conjunto de resistências elétricas que simulam a carga da residência, e foram coletados por um sistema de aquisição de dados constituído por um datalogger Campbell CR1000. Os dados levantados ao final do experimento mostraram uma produção de 1,23 kWh nos 25 dias de coleta perante uma disponibilidade total de 6,6 kWh, resultando num rendimento de 18,7%. Foi realizada, com estes dados, uma análise da viabilidade econômica da implantação do sistema em uma residência na região, concluindo que o sistema ainda é economicamente inviável, pois não chega a cobrir seus custos de implantação ao final de sua vida útil.

Palavras-chave: Energia eólica; Aerogerador; Desempenho.

Abstract

This work aimed to analyze the economic viability of wind energy generation in the urban area of Cascavel - PR, with the purpose of meeting the demand of a single-family residence. The experiment was conducted through the collection and analysis of performance data of a small Greatwatt wind turbine, model S-600, installed in the Alternative Systems Analysis Center (CASA), of the Cascavel campus of the Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). For this purpose, the information on the production of electricity from the turbine and the available wind energy was obtained in a field test by measuring wind speed values, voltage and current supplied by the wind turbine to a set of electrical resistors that simulate the household load and were collected by a data acquisition system consisting of a Campbell CR1000 Datalogger. The data collected at the end of the experiment showed a production of 1.23 kWh in the 25 days of collection with a total availability of 6.6 kWh, resulting in a yield of 18.7%. With these data, an analysis of the economic viability of the implementation of the system in a residence in the region was carried out, concluding that the system is still economically unviable, as it does not cover its implementation costs at the end of its useful life.

Keywords: Wind energy; Wind turbine; Performance.

Resumen

Este trabajo tuvo por objetivo analizar la viabilidad económica de generación de energía eólica en el área urbana de Cascavel - PR, con la finalidad de atender la demanda de una residencia unifamiliar. El experimento fue realizado por medio de la recolección y análisis de datos de desempeño de una turbina eólica de pequeño porte de la marca Greatwatt, modelo S-600, instalada en el Centro de Análisis de Sistemas Alternativos (CASA), del campus de Cascavel de la Universidad Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Para ello, la información de producción de energía eléctrica de la turbina y de la energía eólica disponible se obtuvo en ensayos de campo, midiendo los valores de velocidad de viento,

tensión y corriente eléctrica proporcionada por la turbina eólica para un conjunto de resistencias eléctricas que simulan la carga de la residencia, y fueron recogidos por un sistema de adquisición de datos constituido por un Datalogger Campbell CR1000. Los datos recabados al final del experimento mostraron una producción de 1,23 kWh en los 25 días de recolección ante una disponibilidad total de 6,6 kWh, resultando en un rendimiento de 18,7%. Se realizó, con estos datos, un análisis de la viabilidad económica de la implantación del sistema en una residencia en la región, concluyendo que el sistema aún es económicamente inviable, pues no llega a cubrir sus costos de implantación al final de su vida útil.

Palabras clave: Energía eólica; Aerogenerador; Rendimiento.

1. Introdução

A energia é o produto base para todo o desenvolvimento tecnológico humano, e quanto mais desenvolvida uma sociedade, maior o seu consumo energético. A maior parte da matriz energética mundial está baseada em combustíveis fósseis, o que torna esses recursos finitos. Define-se energias renováveis como provenientes dos ciclos naturais da energia fornecida pelo Sol, portanto se configuram como inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta, diferentemente das fontes fósseis (Pacheco, 2006). Assim, é essencial o desenvolvimento de pesquisa na área de energias renováveis, para produção de energia, provenientes de recursos naturais não finitos (Dal Ponte, 2017).

No âmbito energético, o Brasil possui algumas vantagens em relação à maioria dos outros países, sejam elas naturais ou resultado do trabalho nacional no setor. Tolmasquim (2012) cita a relevância internacional do país nas áreas de prospecção de petróleo em águas profundas, na produção de etanol a partir de vegetais, a bastante desenvolvida geração hidrelétrica, o desenvolvimento exponencial na geração de energia eólica, o amplo e integrado sistema de distribuição de energia elétrica e a grande renovabilidade de sua matriz energética, seja para combustíveis ou produção elétrica.

Desde a crise do petróleo na década de 70, a utilização da energia solar fotovoltaica e a aero geração tem crescido significativamente (Siqueira, 2005). Entretanto, 37,7% de toda a energia produzida no país ainda é dependente de petróleo e seus derivados, o que causa, além de poluição, dependência energética de outros países, uma vez que mesmo autossuficiente em produção, o Brasil ainda não possui tecnologia de refino suficiente (Alves, n.d.).

Segundo Inatomi e Udaeta (2005), “os impactos ambientais gerados pela obtenção de energia interferem enormemente no desenvolvimento sustentável, e o entendimento deles se faz primordial para a análise de implementação de projetos e planejamentos energéticos”. Mesmo uma energia renovável pode ter grandes impactos naturais, como é o caso da energia hidrelétrica, parte majoritária da produção energética brasileira (Miranda, 2018). Muitas vezes, para explorar o potencial hidrelétrico de um corpo de água, é necessário represá-lo. E dependendo da grandeza do empreendimento, esta represa toma dimensões monumentais, o que causa impactos no ambiente que está situada, não só pela perda e alagamento de áreas naturais e até de ocupação humana, mas mudanças climáticas causadas por um novo corpo de água no local.

Por outro lado, a exploração de energia eólica apresenta impactos bem menores, resumidos basicamente à área onde as turbinas se encontram, apresentando assim uma alternativa muito interessante para áreas com potencial eólico aproveitável. Também se caracteriza por ser uma exploração flexível, implementada tanto em usinas com várias turbinas de tamanho suficiente para abastecer cidades, quanto geradores domésticos que possibilitam a redução de energia proveniente da rede pública (Miranda, 2018). O alto potencial eólico em algumas regiões do Brasil e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para o aproveitamento deste potencial tornou a energia eólica uma opção bastante atraente (Parizotto, 2014). Martins, Guarnieri e Pereira (2008) defende que a pesquisa científica em âmbito nacional é essencial para a geração de informações sobre o recurso no país, que servirão de base para a implantação em maior escala desta forma de geração.

A captação de energia eólica é realizada por meio dos chamados aerogeradores. Segundo Manwell, McGowan e Rogers (2009), um aerogerador converte a energia cinética de massas de ar em energia elétrica, diferentemente de um moinho de vento, que a converteria em energia mecânica. Comparado ao gerador de uma hidrelétrica, os aerogeradores necessitam de diâmetros

maiores, uma vez que a densidade do ar é menor que a da água; e a geração é muito menos contínua (Monteiro, 2007). Pinto (2013) classifica os geradores em função da direção do eixo de rotação: de eixo horizontal (horizontal axis wind turbines – HAWT) e de eixo vertical (vertical axis wind turbines – VAWT). Apesar de captarem o vento que as atingem em todas as direções, os geradores verticais perdem espaço no mercado em detrimento da maior estabilidade e regularidade dos horizontais, mesmo que estes devam possuir mecanismos para direcionar o plano de rotação para a posição ideal para cada rajada (Nunes, 2003). De acordo com a ANEEL (2019), aerogeradores são classificados em pequeno porte (potência até 500kW), médio porte (500 – 1000 kW) e grande porte (maior que 1000 kW).

O acionamento de aerogeradores normalmente acontece a partir de 2,5 – 3 m/s, uma vez que ventos mais lentos não justificam energeticamente a geração, e são desaceleradas ou desativadas a partir de 12-15 m/s por segurança da estrutura, devido a turbulência gerada (Amarante et al., 2001). Na pesquisa de Alé et al. (2008), utilizando um gerador muito semelhante ao deste trabalho, foi constatada que a velocidade ideal de produção de energia é em torno de 13 m/s, com um crescimento contínuo da produção até esta velocidade e depois uma queda abrupta de valores.

Entretanto, a energia eólica nem sempre apresenta uma disponibilidade regular (Siqueira, 2005). A solução é analisar a variação desta disponibilidade em um dado local durante o ano, uma vez que a presença de ventos é ligada ao clima da região e conseqüentemente à estação do momento. O orçamento total de uma instalação deste tipo deve sempre ser comparada à rentabilidade de um investimento financeiro comum, e só se torna economicamente viável se apresentar melhor retorno do que este. Basso (2017) utiliza no seu trabalho, também referente a produção de energia eólica em Cascavel -PR, os dados de vida útil do equipamento, custos totais da implantação e a receita gerada para analisar a viabilidade do sistema.

Desta forma, este estudo objetiva avaliar a viabilidade econômica da implantação de um aerogerador de pequeno porte em Cascavel – PR, e conseqüentemente, avaliar a energia eólica disponível no local de instalação do aerogerador; a energia fornecida pelo aerogerador à carga; e a eficiência do sistema de geração eólica em função das variações da velocidade do vento no local.

2. Metodologia

2.1 Caracterização do local

O experimento foi conduzido no Centro de Análise de Sistemas Alternativos (CASA) localizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, campus de Cascavel-PR. A latitude foi de 24°59' S, Longitude 53°23' O e altitude de 750 m. Cascavel se encontra no oeste do Paraná (Figura 1), e é conhecida por ser polo regional universitário e de serviços, além de ter grande expressividade na agropecuária. Segundo o Cresesb (2019), a velocidade média de ventos durante o ano para Cascavel é de 4,96 m/s, com média máxima entre junho e agosto (5,73 m/s) e mínima entre dezembro e fevereiro (4,42 m/s).

Figura 1. Localização de Cascavel – PR.



Fonte: Google Maps (2019).

2.2 Sistema de geração eólica

2.2.1 Aerogerador

O suporte metodológico para o desenvolvimento do presente estudo foi baseado na metodologia proposta por Parizotto (2014) e Basso (2017).

O sistema de geração eólica foi composto por um aerogerador de pequeno porte de eixo horizontal da marca Greatwatt modelo S-600 (Figura 2), com 400 watts de potência nominal à velocidade de vento de 12,5 m/s. O aerogerador foi instalado em uma torre cilíndrica de aço a 11 metros de altura do solo para atingir sua altura ideal de funcionamento, e foi utilizado à tensão de 24 V. A Tabela 1 apresenta as principais características técnicas do aerogerador utilizado no experimento.

Figura 2. Aerogerador Greatwatt S-600.



Fonte: Autores.

Tabela 1. Dados do aerogerador.

| | |
|--|------------------------|
| Configuração | 3 pás, eixo horizontal |
| Diâmetro do rotor | 1,2 m |
| Peso | 6,3 kg |
| Tensão nominal | 12V/24V |
| Potência nominal 12V | 400 W |
| Potência máxima 12V | 550 W |
| Velocidade do vento para start | 3 m/s |
| Velocidade nominal para 12V | 12,5 m/s |
| Velocidade do vento para máxima potência | 25 m/s |
| Velocidade limite | 60 m/s |

Fonte: Autores.

2.2.2 Anemômetro

Para a medição da velocidade e direção do vento foi utilizado um anemômetro de hélices com quatro lâminas, o mesmo instalado no topo da torre eólica, a uma altura de 10 m, do fabricante Young modelo 05106 (Figura 3), cujos dados se encontram na Tabela 2.

Figura 3. Anemômetro Young 05106.



Fonte: Scaled instruments (2021).

Tabela 2. Dados do anemômetro.

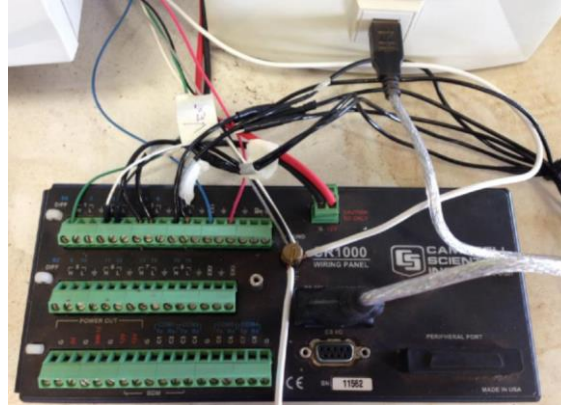
| | |
|-------------------------------|--|
| Velocidade máxima de operação | 100 ms ⁻¹ (360 km ⁻¹) |
| Hélices | 4 hélices de polipropileno de 18cm |
| Alimentação máxima | 15 V DC |
| Sinal de saída | De 0 a 1 VDC |
| Ângulo de medição | 360° |
| Sensibilidade mínima | 1,1 ms ⁻¹ (4 km ⁻¹) com 10° de deslocamento |
| Potência requerida | 5 mA em 12 VDC. |
| Temperatura de operação | De -50 °C à 50 °C. |

Fonte: Scaled instruments (2021).

2.3. Datalogger

Os dados gerados pela turbina e anemômetro foram coletados por um datalogger Campbell modelo CR1000 (Figura 4).

Figura 4. Datalogger Campbell CR1000.



Fonte: Scaled instruments (2021).

2.4 Carga instalada

Objetivando simular um consumo mensal próximo de 50 kWh, ou seja, o consumo característico de uma residência de pequeno porte, foi ligado ao aerogerador um conjunto de seis resistências em paralelo, totalizando, juntamente com a resistência da fiação, 8 ohms. Considerando a tensão da turbina selecionada para 24 V. Os cálculos foram realizados conforme as equações:

Corrente elétrica (Equação 1).

$$I = V/R \quad (1)$$
$$I = 24/8 \rightarrow I = 3 \text{ A}$$

Onde: I = Corrente (A); V = Tensão (V); R = Resistencia (Ω).

Potência (Equação 2).

$$P = V \times I \quad (2)$$
$$P = 24 \times 3 \rightarrow P = 72 \text{ W}$$

Onde: P = Potência (W); I = Corrente (A).

Consumo (Equação 3).

$$G = P \times t \quad (3)$$
$$G = 72 \times 24 \text{ h} \times 30 \text{ dias} \rightarrow G = 51,84 \text{ kWh/mês}$$

Onde: t = tempo (horas); G = Consumo (kWh/mês).

2.5 Determinação da energia elétrica gerada

Com os dados de tensão e corrente elétrica medida no aerogerador, calculou-se a energia elétrica gerada (Equação 4).

$$EGA = \sum_{i=1}^n (V_{aero_i} \times I_{aero_i}) \times t \quad (4)$$

Em que: $t = \frac{1}{12}$ h; n = Enésimo valor do conjunto de dados; V_{aero} = Tensão média na saída do aerogerador (V); I_{aero} = Corrente média na saída do aerogerador (A); EGA = Energia elétrica gerada pelo aerogerador (Wh).

2.6 Determinação da potência disponível no vento

Com os dados meteorológicos da velocidade e temperatura ambiente, calculou-se a energia eólica contida no vento utilizando as Equações 5 e 6. A massa específica do ar, utilizada na Equação 5, foi função da variação da temperatura ambiente.

$$P_v = \frac{\rho v^3 A}{2} \quad (5)$$

Em que: ρ = Massa específica do ar calculada em função da temperatura ambiente (kgm^{-3}); v = Velocidade do vento (ms^{-1}); A = Área varrida pelo rotor do aerogerador (m^2); P_v = Potência disponível no vento (W).

2.7 Determinação da energia eólica disponível

$$EE = \sum_{i=1}^n (P_{v_i} \times t) \quad (6)$$

Em que: $t = \frac{1}{12}$ h; n = Enésima média do conjunto de dados; EE = Energia eólica disponível, Wh.

2.7.1 Rendimento do aerogerador

O rendimento do aerogerador foi realizado pela Equação 7.

$$\eta_a = \frac{EGA}{EE} \times 100 \quad (7)$$

Em que: η_a = Rendimento do aerogerador (%).

2.8 Método do prazo de retorno descontado

De acordo com a Eletrobrás (2009), o método do prazo de retorno descontado, também conhecido como payback descontado, é utilizado para trazer o saldo referente a um investimento para um valor presente, ou seja, considera o valor do capital no tempo. Para isso é atrelada uma taxa de juros a este investimento. E é calculado pela Equação 8.

$$n = \frac{\ln\left(1 - \frac{I \cdot i}{A}\right)}{\ln(1+i)} \quad (8)$$

Onde: n = tempo de retorno; I = investimento; A = economia proporcionada; i = taxa de juros.

3. Resultados e Discussão

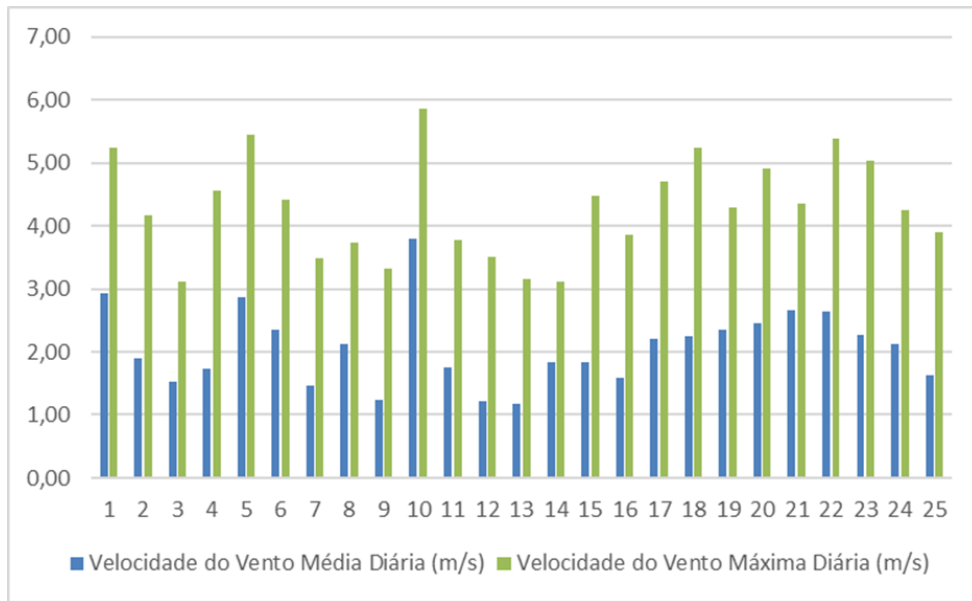
A coleta de dados se deu entre maio e junho do ano 2019, totalizando 25 entradas, e constatou que a direção sudoeste foi a direção predominante dos ventos. Nesta condição os valores médios de velocidade do vento variaram de 1,56 e 3,79 m/s e os valores da velocidade do vento máximos médios diários variaram de 3,11 e 5,86 m/s, conforme os dados apresentados na Tabela 3 e Figura 5. Observa-se que estes valores médios de velocidade do vento são inferiores aos valores recomendados para geração de energia eólica.

Tabela 3. Velocidades do vento média diária (Vm) e Velocidade do vento máxima média diária (Vmax).

| Dias | Velocidade Vento Média Diária (m/s) | Velocidade Máxima Diária (m/s) |
|------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2,93 | 5,24 |
| 2 | 1,91 | 4,17 |
| 3 | 1,52 | 3,11 |
| 4 | 1,74 | 4,55 |
| 5 | 2,86 | 5,45 |
| 6 | 2,35 | 4,41 |
| 7 | 1,46 | 3,48 |
| 8 | 2,13 | 3,74 |
| 9 | 1,23 | 3,32 |
| 10 | 3,79 | 5,86 |
| 11 | 1,76 | 3,77 |
| 12 | 1,21 | 3,50 |
| 13 | 1,17 | 3,15 |
| 14 | 1,84 | 3,11 |
| 15 | 1,83 | 4,47 |
| 16 | 1,58 | 3,86 |
| 17 | 2,22 | 4,70 |
| 18 | 2,24 | 5,24 |
| 19 | 2,34 | 4,29 |
| 20 | 2,45 | 4,91 |
| 21 | 2,66 | 4,35 |
| 22 | 2,63 | 5,38 |
| 23 | 2,27 | 5,04 |
| 24 | 2,12 | 4,25 |
| 25 | 1,62 | 3,90 |

Fonte: Autores.

Figura 5. Velocidades do vento média diária e máxima diária.



Fonte: Autores.

Desta forma, pode se verificar na Tabela 4 e na Figura 6, que os valores de geração de energia elétrica nas condições estabelecidas para o desenvolvimento do experimento, apresentaram valores reduzidos, com relação a capacidade de geração do aerogerador. Isto se deve ao fato de que os valores médios de velocidade do vento ficaram muito abaixo da velocidade de potência nominal do aerogerador.

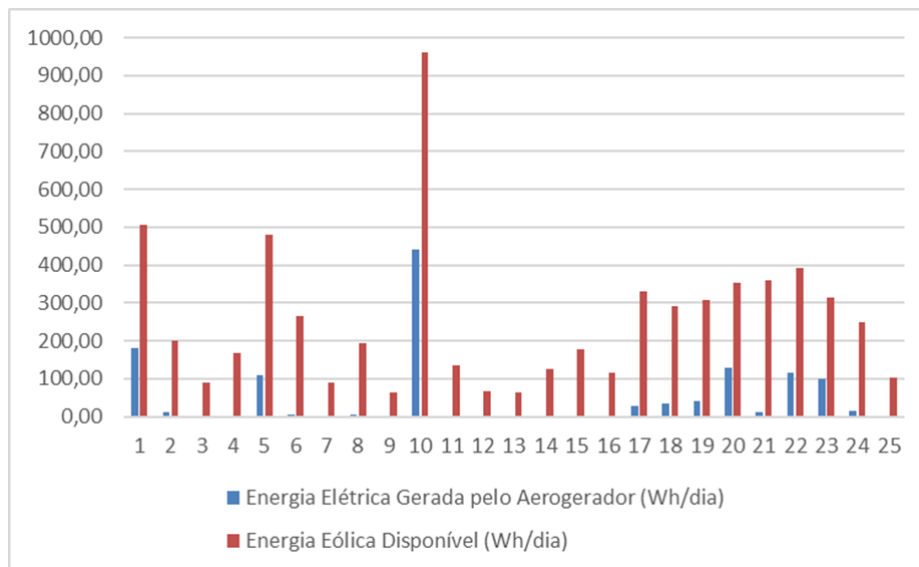
A partir dos dados da Tabela 4, pode-se observar que a energia gerada pelo aerogerador durante os 25 dias de coleta de dados foi de 1,23 kWh. Enquanto, a energia eólica disponível no período foi de 6,6 kWh. Desta forma, o rendimento global do aerogerador no período foi de 18,7%, conforme o gráfico da Figura 7.

Tabela 4. Energia gerada pelo aerogerador (EGA), energia eólica disponível (EE) e rendimento do aerogerador (η_a) para cada dia de coleta de dados.

| Dias | Energia gerada (Wh/dia) | Energia disponível (Wh/dia) | Rendimento η (%) |
|------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1 | 181,82 | 504,87 | 36,01 |
| 2 | 11,12 | 201,18 | 5,53 |
| 3 | 0,00 | 89,27 | 0,00 |
| 4 | 3,20 | 166,29 | 1,93 |
| 5 | 108,03 | 481,32 | 22,44 |
| 6 | 3,86 | 266,47 | 1,45 |
| 7 | 0,00 | 88,11 | 0,00 |
| 8 | 4,12 | 192,23 | 2,14 |
| 9 | 0,00 | 64,88 | 0,00 |
| 10 | 439,76 | 959,89 | 45,81 |
| 11 | 0,18 | 135,61 | 0,13 |
| 12 | 0,02 | 67,64 | 0,02 |
| 13 | 0,00 | 63,20 | 0,00 |
| 14 | 0,00 | 126,24 | 0,00 |
| 15 | 0,50 | 177,38 | 0,28 |
| 16 | 1,41 | 115,33 | 1,22 |
| 17 | 28,23 | 329,98 | 8,56 |
| 18 | 33,05 | 292,03 | 11,32 |
| 19 | 41,32 | 307,91 | 13,42 |
| 20 | 127,40 | 351,51 | 36,24 |
| 21 | 12,11 | 358,58 | 3,38 |
| 22 | 116,48 | 390,89 | 29,80 |
| 23 | 100,61 | 315,38 | 31,90 |
| 24 | 13,96 | 247,55 | 5,64 |
| 25 | 1,39 | 103,32 | 1,35 |

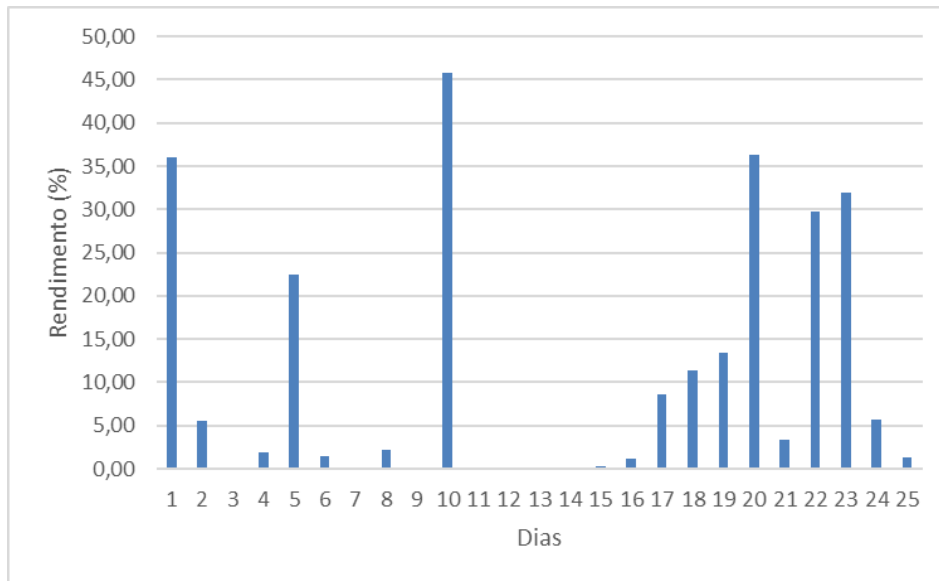
Fonte: Autores.

Figura 6. Energia gerada pelo aerogerador e energia eólica disponível em função dos dias.



Fonte: Autores.

Figura 7. Gráfico do rendimento do aerogerador em função dos dias.



Fonte: Autores.

3.1 Avaliação econômica pelo método payback descontado

Para a avaliação econômica, foi considerado o custo de aquisição do aerogerador de R\$ 2300,00; e uma vida útil deste de 20 anos, sem previsão de custos de manutenção. A taxa mínima de retorno para sistemas de energia renovável é comumente de 6,0% ao ano, a taxa de um investimento financeiro comum. A geração média diária de energia elétrica foi calculada em 0,0492 kWh. Extrapolando estes dados para todos os meses do ano e considerando a tarifa atual de 0,799012 R\$/kWh para o estado do Paraná, o custo evitado com energia elétrica anualmente é apresentado na Tabela 5. O custo de disponibilidade para instalação unifásica é referente a 30 kWh mensais.

Tabela 5. Custo de energia evitado em um ano devido a geração eólica.

| Mês | Dias/ mês | Energia diária gerada (kWh/dia) | Energia mensal gerada (kWh/mês) | Consumo mensal de energia menos custo de disponibilidade (kWh/mês) | Custo evitado de energia (R\$/mês) |
|---------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|--|------------------------------------|
| Janeiro | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 51,23 – 30 = 21,23 | 1,22 |
| Fevereiro | 28 | 0,0492 | 1,37760 | 21,23 | 1,10 |
| Março | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 21,23 | 1,22 |
| Abril | 30 | 0,0492 | 1,47600 | 21,23 | 1,18 |
| Maio | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 21,23 | 1,22 |
| Junho | 30 | 0,0492 | 1,47600 | 21,23 | 1,18 |
| Julho | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 21,23 | 1,22 |
| Agosto | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 21,23 | 1,22 |
| Setembro | 30 | 0,0492 | 1,47600 | 21,23 | 1,18 |
| Outubro | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 21,23 | 1,22 |
| Novembro | 30 | 0,0492 | 1,47600 | 21,23 | 1,18 |
| Dezembro | 31 | 0,0492 | 1,52520 | 21,23 | 1,22 |
| Totais | | | 17,9580 | 254,76 | 14,35 |

Fonte: Autores.

Observa-se que, dos 254,76 kWh passíveis de serem economizados pela geração eólica anualmente, somente 17,96 kWh efetivamente seriam, um percentual de 7,05%.

Em um primeiro cenário mais simples, sem considerar inflação da moeda e aumento da tarifa de energia, a Tabela 6 traz o retorno financeiro do investimento pelo método payback descontado utilizando a equação 8 e taxa de retorno de 6%.

Observa-se que ao final da vida útil do equipamento, o retorno foi de somente R\$ 164,58 (7,16% do valor do investimento); restando um saldo devedor de R\$ 2135,42. A Tabela 7 traz um segundo cenário de payback descontado, desta vez considerando a inflação média da moeda nos oito anos anteriores (5,8%) e a variação da tarifa de energia elétrica anual para o mesmo período (6,5%).

Observa-se que neste caso mais realista, ao final da vida útil do aerogerador, a economia total é de R\$ 174,31 (7,58% do investimento) e o saldo devedor de R\$ 2125,69.

Tabela 6. Retorno financeiro pelo método payback descontado sem inflação e aumento da tarifa de energia.

| Ano | Saldo | Saldo no valor presente | Saldo acumulado VP |
|-----|-----------|-------------------------|--------------------|
| 0 | -2.300,00 | -2.300,00 | -2.300,00 |
| 1 | 14,35 | 13,54 | -2.286,46 |
| 2 | 14,35 | 12,77 | -2.273,69 |
| 3 | 14,35 | 12,05 | -2.261,65 |
| 4 | 14,35 | 11,37 | -2.250,28 |
| 5 | 14,35 | 10,72 | -2.239,56 |
| 6 | 14,35 | 10,12 | -2.229,44 |
| 7 | 14,35 | 9,54 | -2.219,90 |
| 8 | 14,35 | 9,00 | -2.210,90 |
| 9 | 14,35 | 8,49 | -2.202,40 |
| 10 | 14,35 | 8,01 | -2.194,39 |
| 11 | 14,35 | 7,56 | -2.186,83 |
| 12 | 14,35 | 7,13 | -2.179,70 |
| 13 | 14,35 | 6,73 | -2.172,98 |
| 14 | 14,35 | 6,35 | -2.166,63 |
| 15 | 14,35 | 5,99 | -2.160,64 |
| 16 | 14,35 | 5,65 | -2.154,99 |
| 17 | 14,35 | 5,33 | -2.149,67 |
| 18 | 14,35 | 5,03 | -2.144,64 |
| 19 | 14,35 | 4,74 | -2.139,90 |
| 20 | 14,35 | 4,47 | -2.135,42 |

Fonte: Autores.

Tabela 7. Retorno financeiro pelo método payback descontado considerando inflação e aumento da tarifa de energia.

| Ano | Saldo | Saldo no valor presente (I+TMA) | Saldo no valor presente (I+TMA) acumulado |
|-----|-----------|---------------------------------|---|
| 0 | -2.300,00 | -2.300,00 | -2.300,00 |
| 1 | 15,28 | 13,63 | -2.286,37 |
| 2 | 16,27 | 12,94 | -2.273,43 |
| 3 | 17,33 | 12,29 | -2.261,15 |
| 4 | 18,46 | 11,67 | -2.249,48 |
| 5 | 19,66 | 11,08 | -2.238,40 |
| 6 | 20,94 | 10,52 | -2.227,87 |
| 7 | 22,30 | 9,99 | -2.217,88 |
| 8 | 23,75 | 9,49 | -2.208,39 |
| 9 | 25,29 | 9,01 | -2.199,38 |
| 10 | 26,93 | 8,56 | -2.190,82 |
| 11 | 28,69 | 8,13 | -2.182,69 |
| 12 | 30,55 | 7,72 | -2.174,97 |
| 13 | 32,54 | 7,33 | -2.167,64 |
| 14 | 34,65 | 6,96 | -2.160,68 |
| 15 | 36,90 | 6,61 | -2.154,07 |
| 16 | 39,30 | 6,28 | -2.147,80 |
| 17 | 41,86 | 5,96 | -2.141,84 |
| 18 | 44,58 | 5,66 | -2.136,17 |
| 19 | 47,47 | 5,38 | -2.130,80 |
| 20 | 50,56 | 5,10 | -2.125,69 |

Fonte: Autores.

4. Conclusão

Perante os dados, é possível concluir que em nenhum dos casos o investimento em um aerogerador de pequeno porte para uso residencial no local se justifica. Primeiramente, concluiu-se que o rendimento na captação de energia foi de somente 18,7%, abaixo do esperado. Depois, nos dois casos de análise de investimento, o retorno total ao final da vida útil do equipamento cobre somente pequena parte do custo deste (7,16% e 7,58%), sendo incapaz de gerar receita.

A principal causa para tais resultados é a baixa constância de disponibilidade de energia eólica no local, principalmente comparado a regiões no norte do estado e na região nordeste do país, por exemplo. Também é válido destacar que neste caso, para simular um uso real, a carga instalada de 72 W é relativamente alta, o que gera mais resistência e dificulta o livre movimento das pás do gerador.

A tendência é que com o desenvolvimento dos equipamentos de captação, aumentando a sua eficiência e diminuindo seu custo, este investimento seja eventualmente viável.

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar a viabilidade econômica da implantação de um aerogerador de pequeno porte, conectado a um sistema fotovoltaico, formando um sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Referências

- Alé, J. A. V., Simioni, G. C. S., Hack, P. S., & Silva, L. F. (2008). *Avaliação do desempenho de aerogeradores em túnel de vento*. Faculdade de Engenharia (FENG) Pontifícia. Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- Alves, J. R. J. (n.d.). *Setor energético: matriz brasileira, geração e distribuição de eletricidade, transportes*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.
- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., & Sá, A. L. (2001). *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília: Ministério de Minas e Energia Eletrobrás

- ANEEL. (2019). Energia Eólica. [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)
- Basso, T. M. (2017). Análise técnico-econômica de um sistema de geração eólica para uma unidade armazenadora e secadora de grãos (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.
- Cresesb. (2019). *Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito*. <http://www.cresesb.cepel.br/index.php>
- Dal Ponte, E. F. (2017). *Construção e avaliação de um aerogerador de eixo vertical aplicado à agroindústria* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, Brasil.
- Eletrobrás. (2009). *Análise econômica de investimento: guia básico*. Brasília, DF: IEL/NC.
- Google Maps. (2019). *Google Maps*. <https://www.google.com.br/maps/place/Cascavel,+PR>
- Inatomi, T. H. A., & Udaeta, M. E. M. (2005). *Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos*. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP).
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: theory, design and application*. Chippenham, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., & Pereira, E. B. (2008). O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), 1304-1313.
- Miranda, A. G. G. (2018). *Estudo de ciclo de vida de gerador eólico de pequeno porte utilizado em propriedade rural* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, Brasil.
- Monteiro, R. R. (2007). *Análise técnica da implantação de um sistema híbrido eólicasolar para alimentar ERBs em lugares isolados: o caso da estação Antonina/PR*. Curitiba: UFPR.
- Nunes, M. V. A. (2003). *Avaliação do comportamento de aerogeradores de velocidade fixa e variável integrados em redes elétricas fracas* (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Pacheco, F. (2006). Energias renováveis: breves conceitos. *Conjuntura e Planejamento*, 149, 4-11.
- Parizotto, R. R. (2014). *Instalação e avaliação de um sistema de bombeamento d'água com aerogerador de pequeno porte para propriedades rurais na cidade de Cascavel – PR* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, Brasil.
- Pinto, M. O. (2013). *Fundamentos de energia eólica*. Rio de Janeiro: LTC.
- Scaled instruments. (2021). Shop by category. Newberry, FL. https://www.scaledinstruments.com/sop/sop-by-category/anemometer/rm-young-05103-wind-monitor/?gclid=CjwKCAiAJoeRBhAJEiwAYY3nDCp6oSwKitBj7ggxTvV4kBEADHAYzpu8k3QK-0QW-CmNcE-hbYLDMB0Cp68QAvD_BwE
- Siqueira, J. A. C. (2005). *Desempenho de um sistema híbrido eletrofotovoltaico de pequeno porte para energização rural* (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, SP, Brasil.
- Tolmasquim, M. T. (2012). Perspectivas e planejamento do setor energético do Brasil. *Estudos Avançados*, 26, 249-260.