

# Estudo Comparativo de Desempenho Entre Usinas Solar e Eólica Para Sistemas de Microgeração Distribuída de Pequeno Porte

João Hugo Cadeira Brandão  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Mossoró, Rio Grande do Norte  
joao.brandao@alunos.ufersa.edu.br

Ednardo Pereira da Rocha  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Mossoró, Rio Grande do Norte  
ednardo.pereira@ufersa.edu.br

**Resumo**—No presente trabalho, foi realizada uma análise comparativa do desempenho de um sistema de energia solar e eólico com mesma potência nominal. Para tal, foram dimensionados dois sistemas escolhendo os componentes disponíveis no mercado e observando suas características elétricas disponibilizadas pelos seus fabricantes. Ao determinar a energia gerada por ambas as usinas, é preciso utilizar de algum parâmetro para quantificar o desempenho das mesmas. Tendo isso em vista é realizada análise a do fator de capacidade considerando o valor médio esperado em cidades próximas ao do estudo. Dessa forma, é possível determinar com boa exatidão qual sistema possui melhor desempenho para uso residencial, no qual a energia solar demonstrou nos resultados um desempenho muito superior em energia gerada e no fator de capacidade esperado. Além disso, também é perceptível a baixa atratividade para um sistema híbrido considerando os altos custos de instalação de um sistema eólico.

**Paravras-chaves**—eólica, solar, desempenho, energia, híbrido.

**Abstract**— In this work, a performance analysis of a same nominal power solar and wind energy system was carried out. To this, two systems were designed, choosing the components available in the industry and observing their electrical characteristics provided by their manufacturers. When determining the energy generated by both plants, it is necessary to use some parameter to quantify their performance. With this, an analysis of the capacity factor is carried out considering the average value expected in cities nearby the study site. In this way, it is possible to determine with good accuracy which system has the best performance for residential use, in which solar energy has shown in the results a much superior performance in generated energy and in the expected capacity factor. In addition, the low attractiveness for a hybrid system is also noticeable, considering the high costs of installing a wind system.

**Keywords**— wind, solar, performance, energy, hybrid.

## I. INTRODUÇÃO

As fontes de energias provenientes de usinas eólicas e solares tem sido um destaque nos últimos anos. De maneira geral, é possível observar um aumento significativo das energias renováveis no cenário mundial e brasileiro. De forma especial no Brasil, a proporção de utilização de fontes renováveis para não renováveis é maior comparado ao restante do mundo, como é possível observar na figura 1 [1].

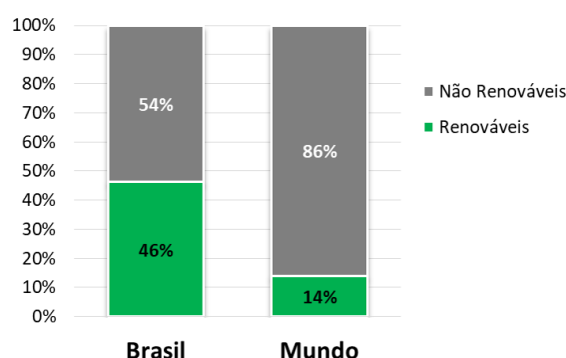


Fig. 1. Proporção de energias renováveis na matriz energética no Brasil e no mundo [1].

Além disso, as energias renováveis devem representar quase 95% do aumento da capacidade energética mundial até o ano de 2026, onde mais da metade do incremento é de energia solar. Tendo isso em vista, é claro o interesse das grandes empresas em tornar as energias renováveis predominante na matriz energética do Brasil e do mundo [2].

Observando o cenário atual, é possível determinar os fatores que levaram ao mesmo. Fatores como diminuição nos custos de fabricação, aumento da eficiência dos módulos, facilidade de implementação de sistemas, redução da burocracia nas concessionárias [3].

Paralelamente, a energia eólica tem sua capacidade instalada crescendo de forma exponencial ao longo dos anos. A figura 2 mostra a capacidade em MW ao longo de 2001 a 2017 [4].

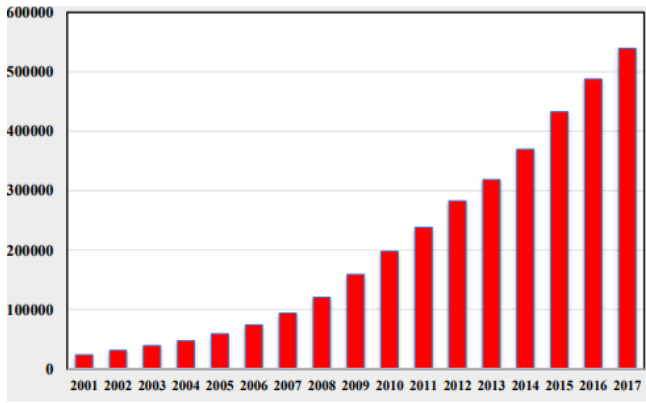


Fig. 2. Capacidade global instalada (MW), 2001 – 2017 [4].

Agora, do ponto de vista da energia solar, no ano de 2022 o aumento de capacidade instalada foi de 44,4 % de GW, saltando de 13,8 GW para os 20 GW até o início do mês de outubro [2].

Levando em consideração todas as informações, estudos que detalhem a eficiência de cada fonte energética em diferentes regiões do país de forma a determinar qual fonte melhor se adequa a cada local são necessários. No presente trabalho, será apresentado o dimensionamento de usina fotovoltaica e eólica a nível residencial, de maneira a escolher a melhor opção de geração própria com base em seu desempenho.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o atual trabalho, foram dimensionados dois sistemas de 6 kW. Para os sistemas fotovoltaicos, a metodologia de dimensionamento pode ser vista em [5]. Para obter um sistema de exatos 6 kW, utiliza-se os módulos Canadian HiKu5 Mono 500 W. Inicialmente é preciso determinar a quantidade de placas mostrada na equação 1. As informações técnicas da placa podem ser visualizadas na figura 3 [6].

### ELECTRICAL DATA | STC\*

| CS3Y                         | 475MS                                    | 480MS   | 485MS   | 490MS   | 495MS   | 500MS   |
|------------------------------|------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Nominal Max. Power (Pmax)    | 475 W                                    | 480 W   | 485 W   | 490 W   | 495 W   | 500 W   |
| Opt. Operating Voltage (Vmp) | 44.0 V                                   | 44.2 V  | 44.4 V  | 44.6 V  | 44.8 V  | 45.0 V  |
| Opt. Operating Current (Imp) | 10.81 A                                  | 10.87 A | 10.94 A | 11.00 A | 11.06 A | 11.12 A |
| Open Circuit Voltage (Voc)   | 52.7 V                                   | 52.9 V  | 53.1 V  | 53.3 V  | 53.5 V  | 53.7 V  |
| Short Circuit Current (Isc)  | 11.52 A                                  | 11.57 A | 11.62 A | 11.67 A | 11.72 A | 11.77 A |
| Module Efficiency            | 20.1%                                    | 20.4%   | 20.6%   | 20.8%   | 21.0%   | 21.2%   |
| Operating Temperature        | -40°C ~ +85°C                            |         |         |         |         |         |
| Max. System Voltage          | 1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)         |         |         |         |         |         |
| Module Fire Performance      | TYPE 1 (UL 61730) or CLASS C (IEC 61730) |         |         |         |         |         |
| Max. Series Fuse Rating      | 20 A                                     |         |         |         |         |         |
| Application Classification   | Class A                                  |         |         |         |         |         |
| Power Tolerance              | 0 ~ + 10 W                               |         |         |         |         |         |

\* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

Fig. 3. Informações técnicas do Canadian HiKu5 Mono 500 Watts. [6]

$$N^{\circ} \text{ placas} = \frac{P_{\text{nominal}}}{P_{\text{módulo}}} = \frac{6}{0,5} = 12 \quad (1)$$

Posteriormente, é preciso escolher um inversor que venha a suportar a potência nominal do sistema. O modelo escolhido foi o Solis-1P6K -4G com potência nominal de 6 kW, tendo em vista que o inversor deve suportar a potência nominal do sistema completo. [7]

Determinando os equipamentos que serão utilizados no sistema, é possível determinar a geração da usina através da equação 2:

$$G = A \eta_{\text{painel}} H_{\text{plano}} n \eta_{\text{sistema}} \quad (2)$$

Onde,

- $A$ : Área útil dos painéis;
- $\eta_{\text{painel}}$ : Eficiência do painel;
- $H_{\text{plano}}$ : Irradiação média do plano inclinado;
- $n$ : Número de dias no mês;
- $\eta_{\text{sistema}}$ : Eficiência do sistema.

Por fim, é preciso determinar os dados solicitados na equação 2. A área dos módulos pode ser determinada através da expressão determinada por geometria básica considerando a área de uma estrutura retangular.

Sabe-se que a quantidade de módulos é de 12. A largura e comprimento podem ser determinados através das dimensões fornecidas no *datasheet*. Observe as dimensões da placa na figura 4.

### ENGINEERING DRAWING (mm)

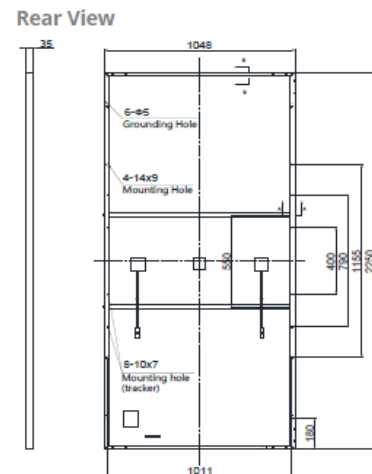


Fig. 4. Dimensões da placa [6].

Importante ressaltar, que as medidas observadas devem ser considerando a área útil dos módulos, desconsiderando as bordas. Dessa forma tem-se a equação 3:

$$A = 12 * 1,011 * 2,213 = 26,84 \text{ m}^2 \quad (3)$$

A eficiência do painel pode ser obtido na figura 7, correspondendo a 21,2%. A irradiação média do plano inclinado é obtido através do *software* *radiasol* [8]

considerando um desvio azimutal de  $-60^\circ$  e inclinação de  $45^\circ$ . As informações do Radasol podem ser observadas na figura 5.

Tabela de Dados

<

Fig. 5. Irradiação média no plano inclinado [Autoria própria].

O número de dias depende do mês analisado, entretanto a análise será feita para todos os meses então é preciso considerar a quantidade de dias para cada mês.

A eficiência do sistema é um valor determinado pelo projetista. Para o presente trabalho, será considerado uma usina com eficiência de 80% sendo este um valor comumente utilizado por projetistas, levando em consideração fatores que possam causar perdas como; temperatura, sujidade e sombreamento.

Para o sistema eólico foi escolhida a turbina eólica VERNE 555 de eixo horizontal, cuja potência nominal é de 6 kW. Na figura 6, é possível observar as especificações técnicas de desempenho do modelo em questão [9].

|                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| Potência Nominal        | 6000W             |
| Rotação Nominal         | 240 RPM           |
| Torque de partida       | 0,3 Nm            |
| Tensão de saída         | 120/240/400 volts |
| Velocidade Nominal      | 12,5 m/s          |
| Velocidade de Partida   | 2,2 m/s           |
| Velocidade Máxima       | 137 km/h          |
| Temperatura de operação | -10 a 50 °C       |

Fig. 6. Dados de desempenho do VERNE 555 [9].

Além disso, o fornecedor Enersud informa que o equipamento possui diâmetro de hélice de 5,5 m e 3 pás. Como a altura não foi informada, será admitida uma altura de 10 metros tendo em vista o uso do sistema para fins residenciais.

Para efetuar o dimensionamento, a Enersud também disponibiliza a curva de geração para o Verne 555, como ilustra a figura 7.

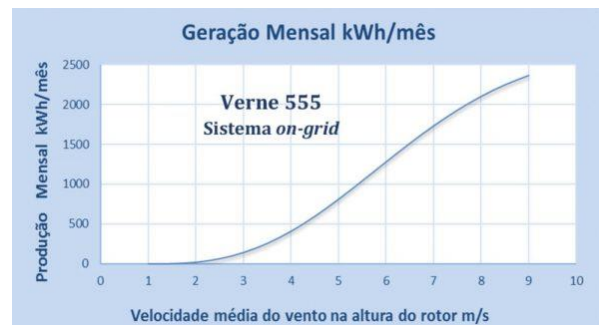


Fig. 7. Curva de geração do VERNE 555. [9]

A velocidade dos ventos foi colhida pelas estações automáticas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido durante o ano de 2021[10]. As estações fazem coletas a cada 15 minutos, totalizando 105.119 amostras. Levando em consideração que altura escolhida para a torre do sistema é de 10 metros, é preciso estimar a velocidade dos ventos para essa altura. De acordo com [11] essa velocidade pode ser calculada pela equação 4:

$$V = V_{ref} \left( \frac{H}{H_r} \right)^n \quad (4)$$

Onde,

- $V$  é a velocidade a ser determinada;
- $V_{ref}$  é a velocidade de referencia;
- $H$  é a altura desejada;
- $H_r$  é a altura de referencia;
- $n$  é expoente da lei de potencia

A altura de referencia é 2 metros. O valor de  $n$ , de acordo com [11] para áreas residenciais é igual a 0,28.

Para simplificar a análise, os dados foram organizados fazendo a média das velocidades em metros por segundo para cada mês. Dessa forma na figura 8 pode-se observar como a velocidade dos ventos estão dispostas durante o ano.

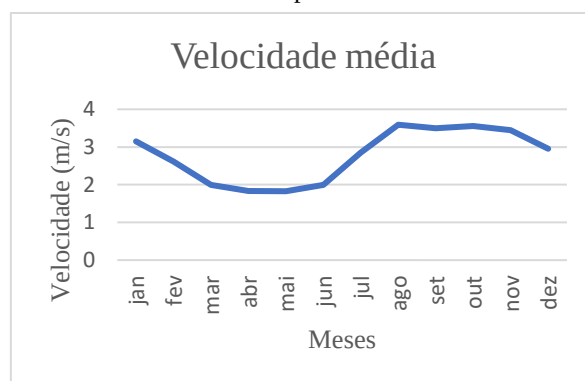


Fig. 8. Velocidade dos ventos para cada mês [Autoria própria].

Para facilitar o tratamento de dados, as informações da figura 7, foi utilizado o site *WebPlotDigitize* [12] para coletar os dados e a partir disso obter uma função através do Excel. Dessa forma, tem-se a curva mostrada na figura 9.

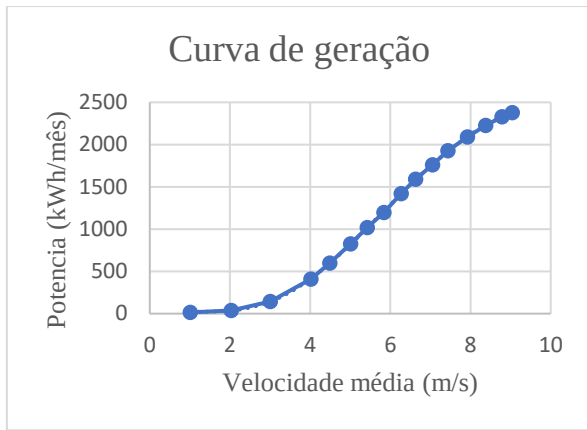


Fig. 9. Curva de geração no excel [Autoria própria].

A partir da figura 9, é possível obter a equação 5 a partir do Excel utilizando interpolação polinomial.

$$Eg = -0,0161v^6 + 0,7545v^5 - 13,192v^4 - 101,27v^3 - 298,41v^2 + 383,28v - 159,07 \quad (5)$$

Onde,

- $Eg$  é energia gerada durante o mês;
- $v$  é velocidade média dos ventos no mês desejado.

Além do dimensionamento, é necessário utilizar algum critério para tornar a análise mais completa. Tendo isso em vista, é interessante o cálculo do fator de capacidade que é um percentual que indica o quanto uma usina gera em relação ao máximo que ela poderia gerar. A partir do fator de capacidade é possível identificar problemas na geração, determinar qual local é mais adequado para a instalação do sistema e indicar a produtividade do mesmo. Tendo isso em mente, o fator de capacidade pode ser calculado através da equação 6 [13].

$$FC = \frac{E}{P_{inst}t} \quad (6)$$

Onde,

- $E$  é a energia gerada pelo sistema;
- $P_{inst}$  é a potência instalada do sistema;
- $t$  é o período usado para a análise.

Para tomar como parâmetro de análise, a ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) possui boletins mensais onde está descrito o fator de capacidade esperado para cada estado.

Para o boletim de geração solar, será levado em consideração o último boletim emitido em agosto de 2021 da cidade de Mossoró, cujo o fator de capacidade em 2021 é de 26,4% [14].

Para o boletim de geração eólica, será levado em consideração o último boletim emitido em agosto de 2021 da cidade de Mossoró, cujo o fator de capacidade em 2021 é de 35,1% [15].

### III. RESULTADOS

Para os resultados, tem-se as tabelas 1 e 2 que mostram a energia gerada pelos dois sistemas, a partir da metodologia já mostrada.

| Mês | Energia Gerada (kWh) |
|-----|----------------------|
| Jan | 172,48               |
| Fev | 83,50                |
| Mar | 35,70                |
| Abr | 30,66                |
| Mai | 30,45                |
| Jun | 35,74                |
| Jul | 116,99               |
| Ago | 280,93               |
| Set | 255,20               |
| Out | 271,90               |
| Nov | 241,55               |
| Dez | 134,64               |

Tab. 1. Energia gerada do sistema eólico [Autoria própria].

| Mês | Energia Gerada (kWh) |
|-----|----------------------|
| Jan | 615,68               |
| Fev | 635,25               |
| Mar | 700,19               |
| Abr | 637,88               |
| Mai | 801,30               |
| Jun | 760,55               |
| Jul | 798,81               |
| Ago | 858,64               |
| Set | 741,86               |
| Out | 789,23               |
| Nov | 716,79               |
| Dez | 638,17               |

Tab. 2. Energia gerada do sistema solar [Autoria própria].

Para facilitar a visualização dos dados, é necessário plotar um gráfico com os dados da tabela 1 e 2 para melhor analisar a diferença de geração entre os dois sistemas como é mostrado na figura 10.

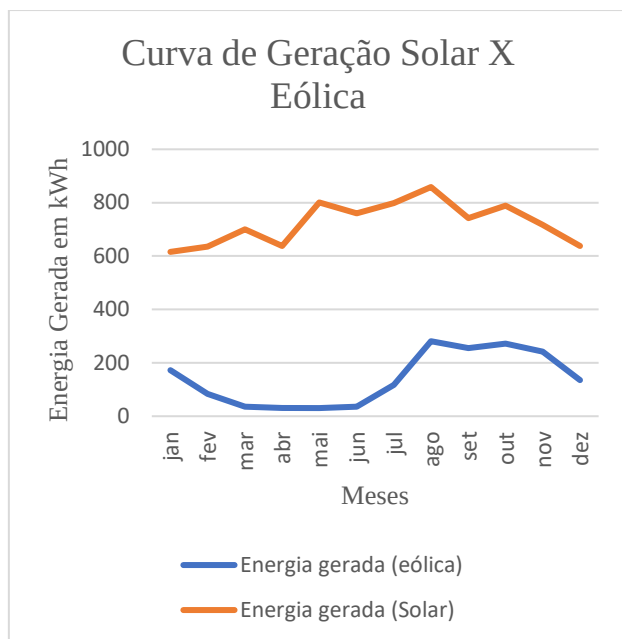


Fig. 10. Curva de geração de energia [Autoria própria].

Calculando o fator de capacidade da usina solar:

$$FC_s = \frac{E}{P_{inst}t} = \frac{8694,43 \text{ kWh}}{6 \text{ kW} * 8760 \text{ h}} = 0,1654 \text{ ou } 16,54\% \quad (6)$$

Calculando o fator de capacidade da usina eólica:

$$FC_e = \frac{E}{P_{inst}t} = \frac{1689,81 \text{ kWh}}{6 \text{ kW} * 8760 \text{ h}} = 0,0321 \text{ ou } 3,21\% \quad (7)$$

#### IV. CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados, é possível verificar uma diferença considerável entre o fator de capacidade de cada tipo de geração de energia elétrica, onde a energia solar obteve um melhor fator de capacidade com uma diferença relevante de aproximadamente 14,00%. Além disso, fazendo a comparação entre os valores do fator de capacidade previsto para essas usinas a diferença para o sistema eólico é de 32% enquanto a usina solar foi de apenas 9,86%. Com base nesses percentuais, é possível constatar que para fins residenciais o sistema fotovoltaico apresenta um desempenho muito superior, tendo em vista que para obter uma maior velocidade dos ventos, é necessário projetar uma torre de maior altura. Vale ressaltar que o resultado obtido é passível de erros tendo em vista possíveis variações nos dados em detrimento da imprevisibilidade da velocidade dos ventos e radiação solar. Entretanto, levando em consideração a grande diferença na geração de energia entre os dois sistemas, as imprecisões se tornam pouco relevantes.

Outro fator que é possível analisar é a viabilidade econômica. De forma menos precisa, de acordo com [16] um sistema de energia solar de até 6,68 kWp pode custar em média R\$ 33.846,34. Por outro lado, de acordo com [17] um

sistema eólico de 6 kWp, pode custar até R\$ 50.000,00. Com bases nessas informações é pouco provável que um sistema híbrido seja viável, tendo em vista a pouca contribuição do sistema eólico em termos de energia gerada e seu elevado custo.

Para futuros trabalhos futuros, uma boa sugestão seria uma análise de viabilidade econômica mais detalhada levando em consideração o preço de cada um dos equipamentos.

#### REFERÊNCIAS

- [1] MATRIZ Energética e Elétrica. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 06 nov. 2022.)
- [2] ENERGIAS renováveis dominarão nova capacidade energética até 2026, diz AIE. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/energias-renovaveis-dominarao-nova-capacidade-energetica-ate-2026-diz-aie/>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [3] ABDALA, Paulo Jayme Pereira. Energia Solar e Eólica. Ponta Grossa: Atena, 2019. 432 p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Luis-Claudio-Lopes-2/publication/330670469\\_DESENVOLVIMENTO\\_DE\\_UM\\_APLICATIVO\\_PARA\\_DIMENSIONAMENTO\\_DE\\_SISTEMAS\\_DE\\_GERACAO\\_FOTOVOLTAICA/links/61573918a6fae644fbbe3fad/DESENVOLVIMENTO-DE-UM-APLICATIVO-PARA-DIMENSIONAMENTO-DE-SISTEMAS-DE-GERACAO-FOTOVOLTAICA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Luis-Claudio-Lopes-2/publication/330670469_DESENVOLVIMENTO_DE_UM_APLICATIVO_PARA_DIMENSIONAMENTO_DE_SISTEMAS_DE_GERACAO_FOTOVOLTAICA/links/61573918a6fae644fbbe3fad/DESENVOLVIMENTO-DE-UM-APLICATIVO-PARA-DIMENSIONAMENTO-DE-SISTEMAS-DE-GERACAO-FOTOVOLTAICA.pdf). Acesso em: 06 nov. 2022.]
- [4] SILVA, R. A.; AZEVEDO, F. F. O desenvolvimento do setor eólico no Brasil e no mundo. Formação (Online), v. 28, n. 53, p. 809-828, 2021.
- [5] VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, v. 2, 2012.
- [6] CanadianSolar. HiKu5 Mono. Disponível em: <https://www.suministrosorduna.com/pt-pt/catalogo/canadian-solar-hiku5-475-500-w/>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [7] SOLIS. Solis-1P(2.5-6)K-4G. Disponível em: [https://www.ginlong.com/1p\\_inverter3/23948.html](https://www.ginlong.com/1p_inverter3/23948.html). Acesso em: 06 nov. 2022.
- [8] Radiasol 2. 2.0.
- [9] ENERSUD. TURBINA EÓLICA VERNE 555. Disponível em: <https://www.enersud.com.br/turbina-eolica-verne-555/>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [10] UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO. Dados Meteorológicos. Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/dados-emas/>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [11] GUESSE, MARINA LATINI. Dimensionamento de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte aplicada a residências. Campus UFRJ-Maccé, 2016.
- [12] WEBPLOTDIGITALIZER. Disponível em: <https://apps.automeris.io/wpd/>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- [13] ENERGÊS. ENTENDA TUDO SOBRE O FATOR DE CAPACIDADE. Disponível em: <https://energes.com.br/fator-de-capacidade/>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [14] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Boletim Mensal de Geração Fotovoltaica Agosto/2021. Quixeré, 2021.
- [15] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Boletim Mensal de Geração Eólica Agosto/2021. Russas, 2021.
- [16] PORTAL SOLAR (org.). Painel solar: preços e custos de instalação. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>. Acesso em: 06 nov. 2022.
- [17] DIÁRIO DO NORDESTE (org.). Energia eólica em casa: como produzir e quanto custa a instalação. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/energia-eolica-em-casa-como-produzir-e-quanto-custa-a-instalacao-1.3140180>. Acesso em: 06 nov. 2022.