



AJUSTE DE CURVA DA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA ¹

Felipe da Rosa², Airam Tereza Zago Romcy Sausen³, Paulo Sérgio Sausen⁴, Maurício de Campos⁵

¹ Artigo científico desenvolvido em disciplina do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional da Unijuí;

² Estudante do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

⁵ Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, UNIJUÍ;

RESUMO

A produção de energias renováveis é um dos temas mais debatidos atualmente pelas autoridades ao redor do mundo, devido aos efeitos nocivos que muitas das fontes de energia convencionais têm causado ao nosso planeta. É urgente reverter essa situação enquanto ainda há tempo. Neste trabalho, será realizado um ajuste de curvas utilizando a ferramenta computacional Python para estimar a geração de energia fotovoltaica por painéis solares em dias ensolarados e nublados. Os dados reais utilizados foram extraídos de gráficos presentes em uma dissertação, com o auxílio de uma ferramenta digital, e passaram por um processo de tratamento. Posteriormente, foram implementados computacionalmente e os resultados obtidos foram comparados e discutidos.

Palavras-chave: Modelagem Matemática. Ajuste de Curva. Energias Renováveis.

ABSTRACT

The production of renewable energy is one of the most debated topics by authorities around the world today, due to the harmful effects that many conventional energy sources have caused to our planet. It is urgent to reverse this situation while there is still time. In this work, curve fitting will be performed using the Python computational tool to estimate photovoltaic energy generation by solar panels on sunny and cloudy days. The actual data used were extracted from graphs found in a dissertation, with the help of a digital tool, and underwent a treatment process. Subsequently, they were implemented computationally, and the results obtained were compared and discussed.

Keywords: Mathematical Modeling. Curve Fitting. Renewable Energy.

INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de energia em todo o mundo, impulsionada pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento econômico, tem provocado uma exploração intensiva de recursos energéticos convencionais, como petróleo e carvão. Mas a dependência desses combustíveis fósseis exausta os recursos naturais e causa poluição do ar e gases de efeito estufa. Em tal situação, a adoção de fontes de energia renováveis parece ser uma



solução fundamental para a sustentabilidade energética e ambiental. A energia solar fotovoltaica tem se destacado entre as diferentes fontes de energia renovável devido à sua capacidade de fornecer energia de forma limpa e abundante, aproveitando a luz solar disponível em quase todos os lugares.

A modelagem da geração de energia por painéis fotovoltaicos está se tornando cada vez mais importante para maximizar a eficiência e a viabilidade econômica de seus sistemas. Modelos precisos e ajustados permitem prever a produção de energia com mais precisão, encontrar possíveis falhas e otimizar o desempenho dos sistemas. A modelagem pode incluir a análise de curvas de desempenho, que mostram como as variáveis como irradiância solar, temperatura ambiente e potência gerada se relacionam entre si, conforme afirmado por K. T. Kutscher em seu livro "Energia Solar: Fundamentos e Técnicas de Modelagem" (Kutscher, 2005), o ajuste de curva é necessário para adaptar os modelos teóricos às condições de operação reais. Isso garante que os sistemas fotovoltaicos funcionem de maneira eficiente em vários ambientes e climas.

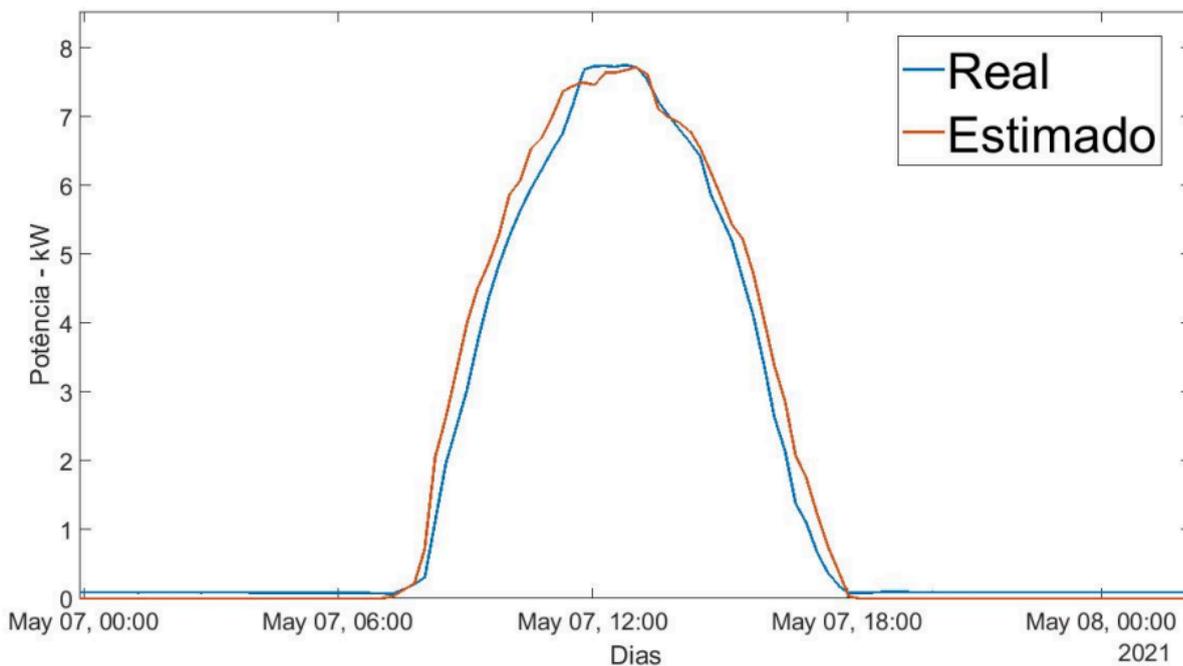
As fontes de energia renováveis, como a energia solar, são reconhecidas por sua capacidade de diminuir os efeitos ambientais causados pelas fontes de energia convencionais. De acordo com um relatório da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020), é possível reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. A energia solar também pode aumentar a segurança energética e o crescimento econômico local, especialmente em regiões remotas e em desenvolvimento.

Além disso, a modelagem da geração de energia fotovoltaica está em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). O ODS 7, em particular, "Energia Acessível e Limpa", destaca a importância de garantir que todos tenham acesso à energia confiável, sustentável e moderna. A implementação de tecnologias fotovoltaicas e a modificação de modelos de previsão da geração de energia são etapas cruciais para atingir esse objetivo, ao mesmo tempo em que promovem a inclusão energética e a sustentabilidade ambiental.

Conforme avaliado por A. C. Luque e S. Hegedus em "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" (Luque & Hegedus, 2003), os modelos de previsão e operação podem ser ajustados para maximizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Essas melhorias



Figura 1- Gráfico que estima a produção fotovoltaica em um dia ensolarado.

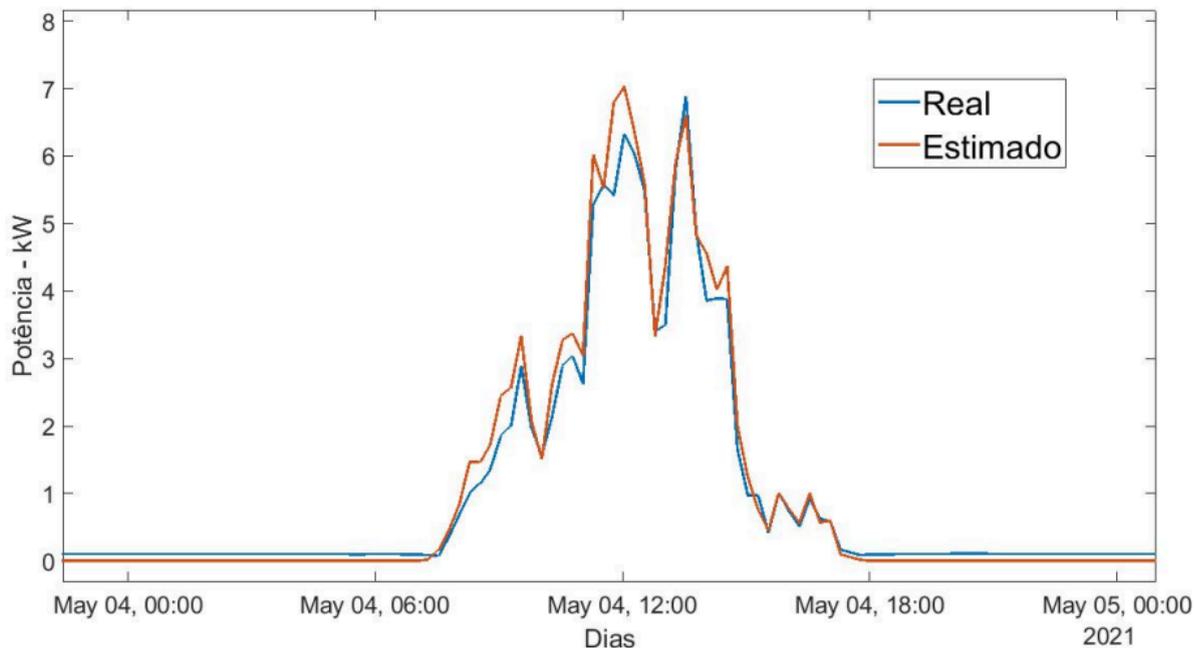


Fonte: Almeida, Matheus Reis de; Dissertação “Estimativa de Geração Fotovoltaica BTM sob a Perspectiva de Variação de Fluxo de Potência”, 2023.

E o outro gráfico que será utilizado, será o gráfico que mostra a estimativa de geração fotovoltaica para um dia nublado, abaixo o gráfico.



Figura 2 - Gráfico que estima a produção fotovoltaica em um dia nublado.

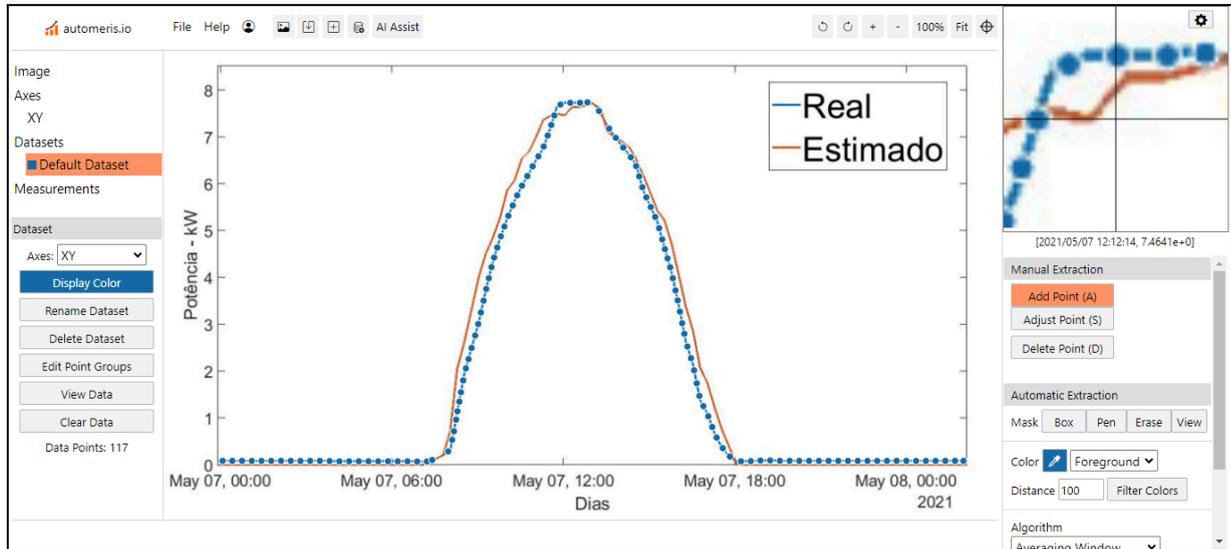


Fonte: Almeida, Matheus Reis de; Dissertação “Estimativa de Geração Fotovoltaica BTM sob a Perspectiva de Variação de Fluxo de Potência”, 2023.

Os dados foram retirados dos gráficos com a ajuda da ferramenta “WebPlotDigitizer”, um aplicativo semi automático que faz o upload da imagem do gráfico, após fazer a calibragem dos eixos foi feita a marcação dos pontos utilizando a função que faz a marcação com base na cor das linhas no gráfico, mas para garantir que não houvesse nenhum erro, foi realizado a conferência dos pontos marcados e até mesmo alguns ajustes de pontos quando necessário. Abaixo temos a interface do aplicativo com os pontos já marcados.



Figura 3 - Interface da Ferramenta WebPlotDigitizer.



Fonte: Autoria Própria.

Para realizar o ajuste de curvas foi utilizado o software computacional Python, é importante frisar que para uma melhor aplicação dos dados, as horas foram transformadas em minutos corridos após o primeiro dado coletado. No gráfico que estima a geração fotovoltaica em um dia ensolarado foram realizados dois ajustes de curva, em ambos os ajustes foram utilizadas as bibliotecas “NumPy”, “Matplotlib”, “SciPy” e “Scikit-Learn”. O primeiro ajuste foi realizado utilizando um modelo de Série de Senos, o qual foi escolhido por fazer uma boa representação de dados periódicos ou quase periódicos e assim se mostra como uma boa opção para fazer o ajuste do referido gráfico.

$$f(x) = a + b_1 \text{sen}(c_1 x + d_1) + b_2 \text{sen}(c_2 x + d_2)$$

O modelo em questão trabalha com duas funções seno, de modo que a representa o termo constante do modelo, b_1 , c_1 e d_1 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da primeira função seno e b_2 , c_2 e d_2 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da segunda função seno.

O segundo ajuste de curvas foi realizado utilizando um modelo Polinomial, selecionado por sua flexibilidade e capacidade de representar de forma eficaz diferentes tipos de curvas.



$$f(x) = a_9x^9 + a_8x^8 + a_7x^7 + a_6x^6 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$$

O modelo Polinomial empregado possui um grau 9, o que significa que é expresso na forma de uma equação com coeficientes $a_9, a_8, a_7, a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1$ e a_0 .

Para realizar o ajuste de curva referente ao gráfico que estima a geração fotovoltaica em um dia nublado, foram utilizadas as bibliotecas “NumPy”, “Matplotlib” e “SciPy” do Python. O modelo escolhido para realizar o ajuste foi uma função composta por cinco termos senoidais.

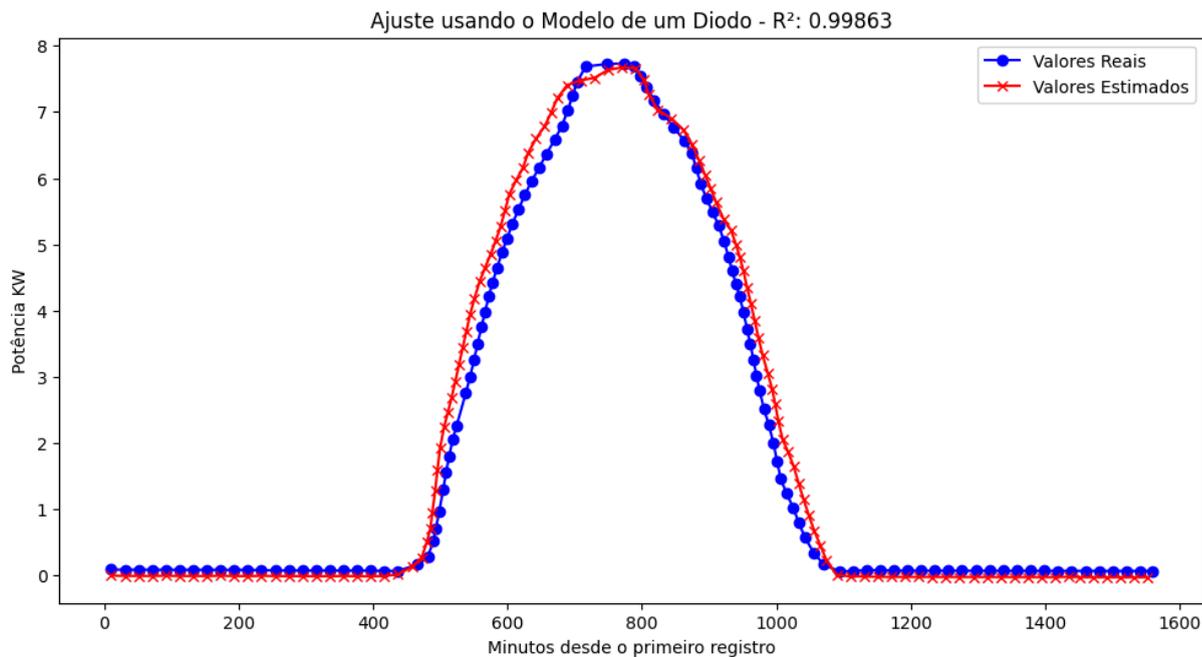
$$f(x) = a + b_1\text{sen}(c_1x + d_1) + b_2\text{sen}(c_2x + d_2) + b_3\text{sen}(c_3x + d_3) + b_4\text{sen}(c_4x + d_4) + b_5\text{sen}(c_5x + d_5)$$

O modelo em questão trabalha com cinco funções seno, de modo que a representa o termo constante do modelo, b_1, c_1 e d_1 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da primeira função seno, b_2, c_2 e d_2 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da segunda função seno, b_3, c_3 e d_3 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da terceira função seno, b_4, c_4 e d_4 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da quarta função seno e b_5, c_5 e d_5 representam respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase da quinta função seno.

Como a dissertação não traz o coeficiente de determinação (R^2) da curva gerada pelo modelo de um diodo referente a curva formada pelos dados coletados pela estação meteorológica da Unijuí, foi feito a replicação do gráfico original de um dia ensolarado para encontrar o R^2 , abaixo trago a imagem do mesmo.



Figura 4 - Gráfico Utilizando o Modelo de um Diodo no caso do dia ensolarado no Python.

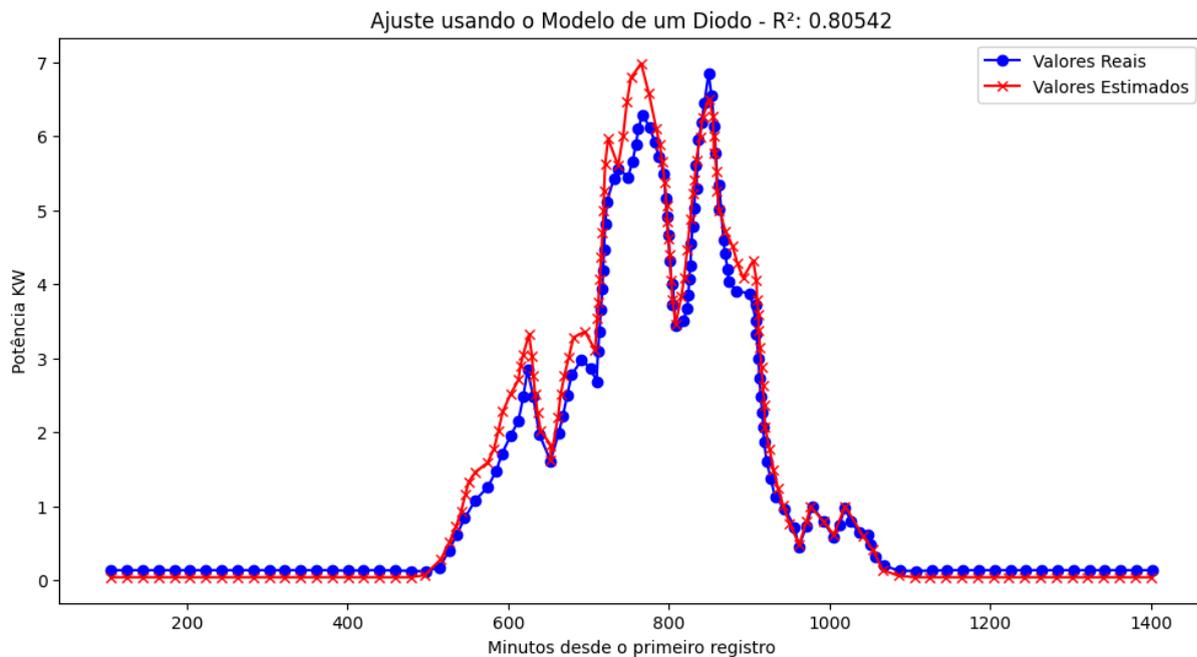


Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma, foi realizada a replicação do gráfico original da estimativa de geração fotovoltaica de um dia nublado para encontrar o valor do coeficiente de determinação (R^2) a propósito de comparar com as curvas de ajustes, abaixo o gráfico.



Figura 5 - Gráfico Utilizando o Modelo de um Diodo no caso do dia nublado no Python.



Fonte: Autoria Própria.

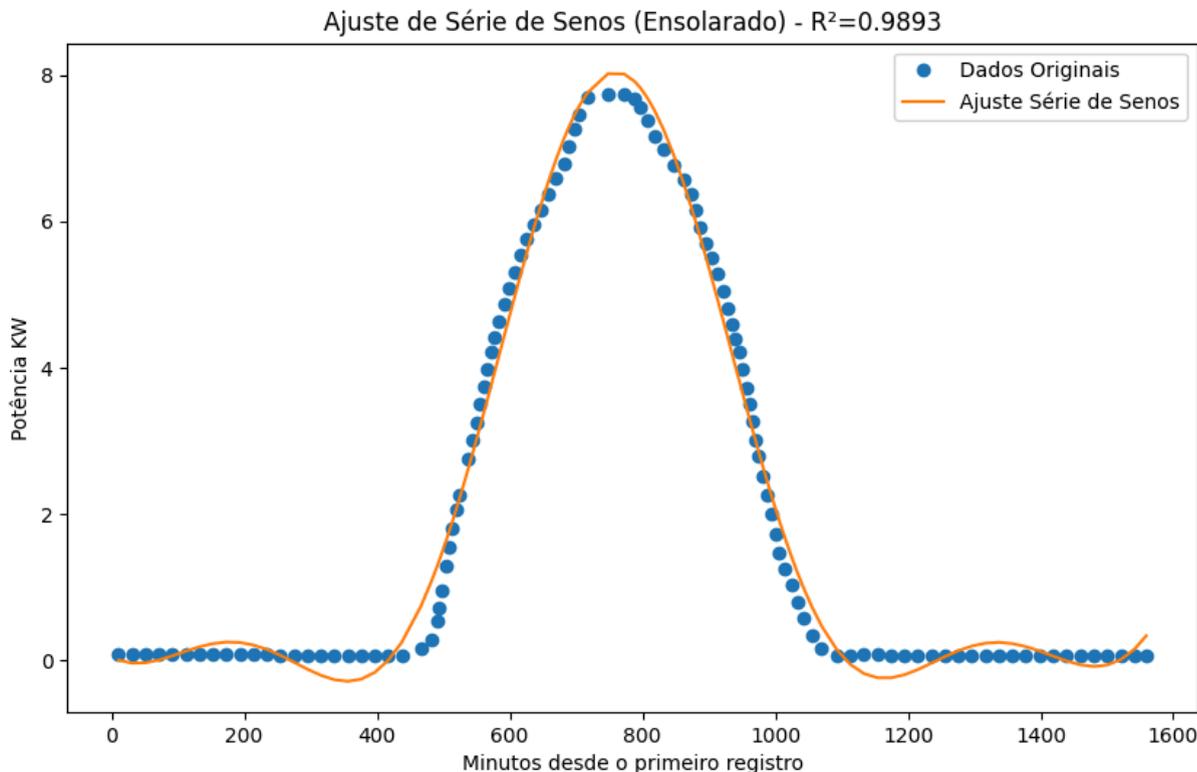
Com todos os dados e informações necessárias para dar prosseguimento ao trabalho, partiu-se então para a implementação dos modelos em Python e posteriormente a análise e comparação dos resultados obtidos para como os dados originais e o modelo utilizado na dissertação.

RESULTADOS

Ao calcular o coeficiente de determinação (R^2) do modelo de um diodo com base nos dados coletados em um dia ensolarado, observou-se um valor bastante elevado de $R^2 = 0,99863$, como é possível ver na Figura 4, indicando que o modelo de um diodo representa muito bem os dados coletados. Como dito anteriormente, o primeiro ajuste de curva realizado utilizou-se o modelo de Série de Senos. Abaixo, apresenta-se a representação gráfica do ajuste, bem como o valor do R^2 da curva de ajuste em relação à curva formada pelos dados coletados.



Figura 6 - Gráfico do Ajuste de Curva do dia ensolarado do Modelo de Série de Senos no Python.

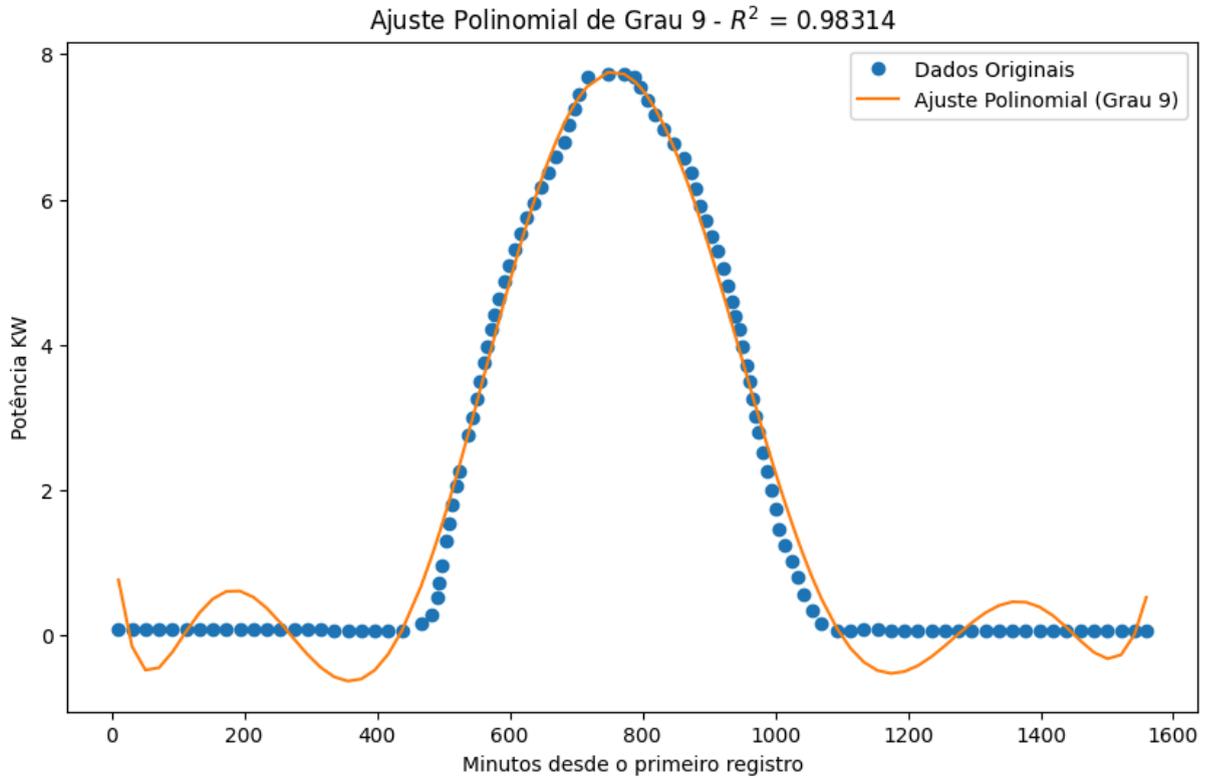


Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que a curva de ajuste da Série de Senos também representa bem os dados, embora o coeficiente de determinação seja ligeiramente menor que o da curva do modelo de um diodo. Isso ocorre porque a função de Série de Senos tem dificuldade em representar os dados nos momentos em que a placa não está recebendo insolação, algo que o modelo de um diodo faz com maior precisão. O segundo ajuste foi realizado utilizando o modelo Polinomial, representado por um polinômio de grau 9. Abaixo está a representação gráfica do ajuste.



Figura 7 - Gráfico do Ajuste de Curva do dia ensolarado do Modelo Polinomial no Python.



Fonte: Autoria Própria.

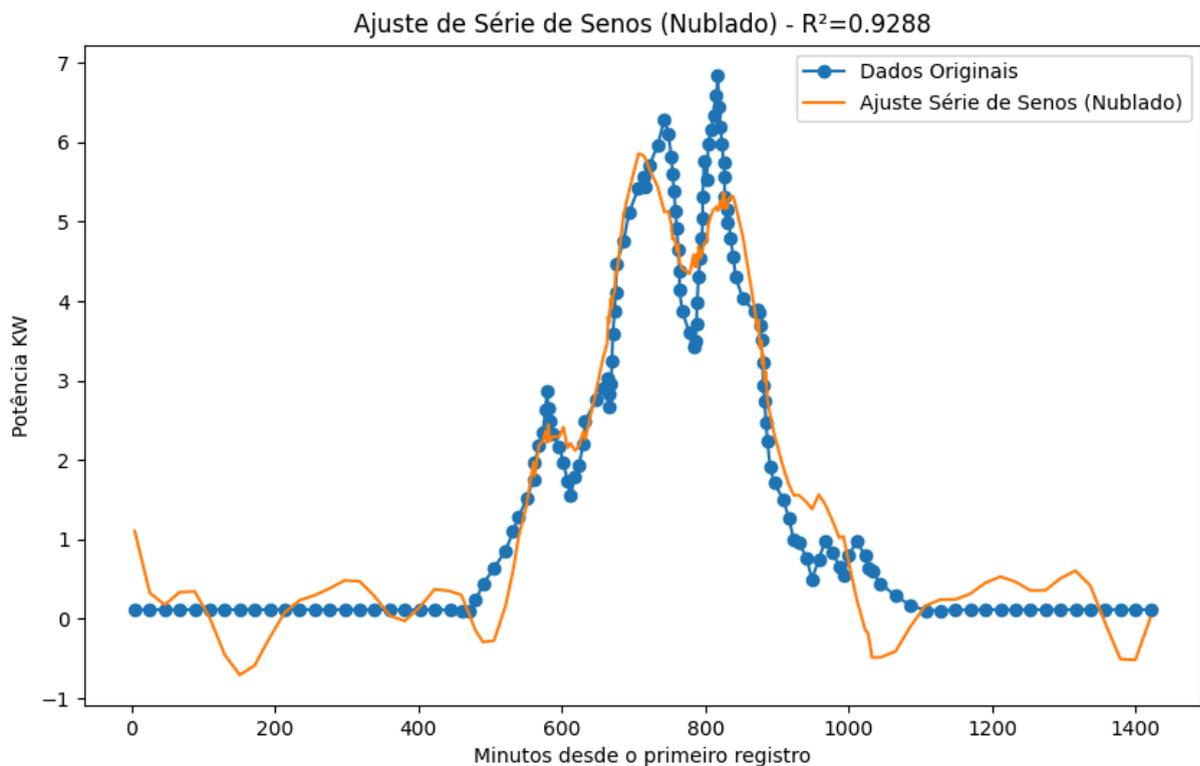
Embora o modelo Polinomial forneça uma boa representação dos dados, ele apresenta a mesma dificuldade que o modelo de Série de Senos ao representar os momentos em que as placas fotovoltaicas não recebem insolação. Assim, pode-se concluir que, para a estimativa de geração fotovoltaica em um dia ensolarado, o modelo de um diodo oferece uma representação mais precisa dos dados em comparação com os modelos Polinomial e de Série de Senos, demonstrando ser um modelo mais confiável.

Já sobre o gráfico da estimativa de geração fotovoltaica de um dia nublado, o coeficiente de determinação é $R^2 = 0,80542$, como é possível ver na Figura 5, indicando que modelo de um diodo consegue fazer a representação dos dados, mas em determinados momentos não consegue ser tão preciso quanto foi anteriormente no caso da estimativa em dia ensolarado, por outro lado, o gráfico da estimativa em dia nublado é bastante complexo devido às variações e inconstâncias, o que dificulta bastante encontrar um modelo que faça uma boa representação dos dados.



Após muitos testes foi escolhido o modelo de Série de Senos para fazer o ajuste de curva dos dados coletados em um dia nublado, como já dito anteriormente, o modelo trabalha com cinco funções senos para tentar fazer um melhor ajuste de curvas, abaixo o gráfico do ajuste.

Figura 7 - Gráfico do Ajuste de Curva do dia nublado do Modelo Série de Senos no Python.



Fonte: Autoria Própria.

Ao comparar os coeficientes de determinação do modelo de um diodo com o modelo de série de senos, podemos verificar que o R^2 do modelo de série de senos é maior que o do modelo de um diodo, porém ao olharmos para o gráfico da figura x podemos perceber que o modelo em questão faz uma representação muito precisa em alguns momentos e acaba por fazer uma representação não tão precisa em outros momentos, enquanto o modelo de série de senos acaba sendo mais inconstante com muitas oscilações.

Podemos concluir que, mesmo no caso do dia nublado, por mais que não consiga fazer uma representação tão precisa, o modelo de um diodo é um modelo muito eficaz e na maioria dos momentos muito assertivo na representação, os modelos utilizados nos ajustes,



principalmente no caso do dia ensolarado, fazem uma boa representação dos dados, embora em alguns momentos acaba se distanciando bastante dos dados reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 2030. (2015). ODS – Objetivos de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 30 de julho de 2024.

KUTSCHER, K. T. *Solar Energy: Fundamentals and Modeling Techniques*. Londres: Springer, 2005.

LUQUE, A. C.; HEGEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: Wiley, 2003.

TAYLOR, Michael. *Energy subsidies: Evolution in the Global Energy Transformation to 2050*. Technical Paper 1/2020. Abu Dhabi: INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Energy_subsidies_2020.pdf?rev=4c60e02b33b54c97a4c26725a1c85e02>. Acesso em: 20 de julho de 2024.

VANDERPLAS, Jake. *Python Data Science Handbook. 1. ed.* Sebastopol: O'Reilly Media, 2016.

WEBPLOTDIGITIZER. *WebPlotDigitizer*. Disponível em: <<https://automeris.io/WebPlotDigitizer>>. Acesso em: 20 de julho de 2024.