

DESENVOLVIMENTO DE ESTIMAÇÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR PARA PERFIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Matheus Henrique da Silva¹, Wesley Angelino de Souza²

RESUMO:

A radiação solar é uma fonte de energia renovável a qual é convertida em irradiação ao entrar na Terra, desempenhando um papel essencial na operação de sistemas fotovoltaicos. Dada a relevância dessa grandeza, este trabalho explora o desenvolvimento de um protótipo acessível para coleta de variáveis meteorológicas e estimação da irradiação solar ao longo do dia em diversas condições climáticas. A metodologia inclui literatura onde técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais artificiais têm se mostrado eficazes na estimação de irradiação com base em dados meteorológicos e históricos. Esses métodos permitem a detecção automática de padrões em grandes volumes de dados, oferecendo maior precisão na estimativa de valores específicos, comparado aos modelos estatísticos tradicionais. Foi desenvolvido um protótipo utilizando sensores de baixo custo, como o de temperatura e umidade DHT22 conectado ao microcontrolador ESP32, para coletar dados meteorológicos na região de Cornélio Procopio, caracterizada por clima subtropical com variações sazonais distintas. Os dados coletados durante os meses de março e abril de 2024 foram utilizados para treinar um modelo de Perceptron Multicamadas, que alcançou um coeficiente de determinação (R^2) de 86,19%, indicando bom desempenho na previsão da irradiação solar. Esse resultado reflete a viabilidade de uso de sensores simples aliados a técnicas avançadas de aprendizado de máquina para fornecer estimativas precisas de irradiação, fundamentais para otimizar o desempenho e a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos.


Palavras-chave: irradiação solar. aprendizado de máquina. sistemas fotovoltaicos.

1 INTRODUÇÃO

A energia solar é uma das fontes renováveis mais importantes, emitida pelo sol e transmitida como ondas eletromagnéticas que, ao alcançar a Terra, são convertidas em formas utilizáveis de energia, como calor e eletricidade (GÓMEZ et al., 2018). Historicamente, o uso da energia solar como fonte de eletricidade iniciou-se no século 19, impulsionado pelos avanços tecnológicos da Revolução Industrial, resultando nos primeiros sistemas fotovoltaicos que incluíam painéis solares, controladores de carga e inversores (KUMAR et al., 2023). Esses sistemas mostraram-se especialmente promissores para regiões remotas, onde o acesso à rede elétrica era limitado.

O avanço tecnológico ao longo das décadas permitiu que a energia solar se consolidasse como uma alternativa viável aos métodos convencionais baseados em combustíveis fósseis, que são grandes responsáveis por emissões de gases de efeito estufa e degradação ambiental. Por ser limpa e renovável reduz a dependência de recursos finitos e também contribui significativamente para a mitigação das

¹  Voluntário PIVIC, Engenharia de Controle e Automação; ✉ matheussilva.2019@alunos.utfpr.edu.br.

²  Docente do Departamento Acadêmico de Elétrica; ✉ weslevangelino@utfpr.edu.br.

mudanças climáticas (ALTASSAN, 2023). No contexto atual de transição energética global se destaca como método de geração mais adotada, sendo responsável por três quartos do aumento da capacidade renovável mundial em 2023 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo acessível para coletar variáveis meteorológicas e estimar a irradiação solar ao longo do dia em diferentes condições climáticas. A acurácia na estimação da irradiação é crucial para o dimensionamento, a viabilidade econômica e a eficiência desses sistemas fotovoltaicos. A hipótese central deste estudo é que, através da integração de sensores de baixo custo com algoritmos de aprendizado de máquina, é possível estimar a variável alvo de forma confiável ao comparar com dados oficiais de institutos meteorológicos. Essa abordagem visa não apenas o monitoramento contínuo da irradiação em tempo real, mas também a otimização dos sistemas fotovoltaicos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O uso do aprendizado de máquina destaca-se pela eficácia para estimar e prever irradiação solar com base em dados meteorológicos e históricos e modelos de redes neurais artificiais têm se destacado por sua capacidade de lidar com grandes volumes de dados e detectar padrões complexos que impactam nas previsões (MURPHY, 2012). As redes neurais profundas apresentam vantagens significativas ao lidar com a variabilidade climática, superando as limitações dos métodos estatísticos convencionais (ZHOU et al., 2021; BRAHMA; WADHVANI, 2020). Esse avanço tecnológico é relevante para regiões como Cornélio Procopio, no Paraná, com clima subtropical marcado por variações sazonais claras, nas quais as variáveis meteorológicas são analisadas para entender suas interações e o impacto nas condições atmosféricas (YNOUE et al., 2021). A temperatura e a irradiação solar têm uma correlação direta, onde variações na intensidade do calor atmosférico são reguladas pela posição geográfica e pelo horário do dia (MOREIRA; SENE, 2021). A umidade do ar, por sua vez, está intimamente ligada à precipitação e à pressão atmosférica, afetando a disponibilidade de vapor d'água na atmosfera. A quantificação da irradiação solar, medida pela radiação solar global, é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, como sistemas fotovoltaicos, e para a regulação de processos naturais e tecnológicos (ANDRADE; BASCH, 2012).

3 METODOLOGIA

Uma revisão tecnológica dos sensores disponíveis incluiu o piranômetro para irradiação solar, que opera através do aquecimento diferencial detectado por junções termoeletrônicas (BARBIERI et al., 2017); o pluviômetro com sistema de auto esvaziamento para medições contínuas de precipitação (ORTIZ, 2014); o barômetro BMP180, que utiliza um sensor piezorresistivo para medições precisas de pressão atmosférica (CASAGRANDE; SEVERO, 2018); e anemômetros para a medição de direção e velocidade do vento por indução eletromagnética (ORTIZ, 2014). Para este trabalho, no entanto,

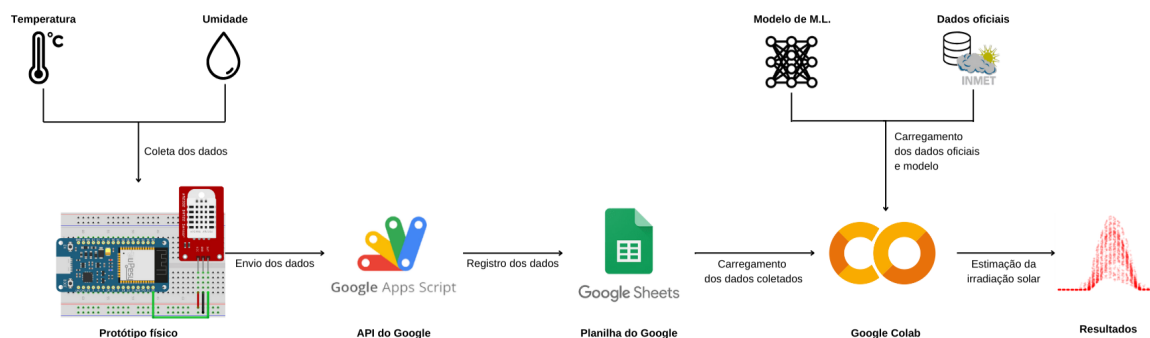


Figura 1 – Fluxograma da solução desenvolvida. Fonte: Autoria própria.

optou-se exclusivamente pelo sensor DHT22, que mede temperatura e umidade com alta precisão, operando em uma ampla faixa de condições climáticas e transformando variações de capacitância causadas pela presença de vapor d'água em um sinal elétrico correspondente (AHMAD et al., 2021). Este sensor foi integrado ao microcontrolador ESP32, escolhido por sua conectividade Wi-Fi, suporte a múltiplas interfaces de entrada e saída, e capacidade de processamento com seu dual-core Xtensa LX6 (ALLAFI; IQBAL, 2017). A implementação do protótipo, mostrada na Figura 1, utilizou o ESP32 programado na IDE do Arduino, configurado para transmitir dados coletados em tempo real para o Google Sheets via requisições HTTP, utilizando Google Apps Script, proporcionando um monitoramento contínuo e simplificado das variáveis meteorológicas, otimizando a estimativa da irradiação solar com modelos de aprendizado de máquina (SILVA; SOUZA, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A coleta de dados foi realizada na região de Cornélio Procopio durante março e abril de 2024, com medições feitas quatro vezes por hora para garantir uma alta precisão na estimativa. Os dados coletados incluíram temperatura, umidade, data e hora, permitindo a análise das variações diárias e sazonais dessas variáveis, essenciais para entender a dinâmica climática local e sua correlação com a irradiação solar, veja na Figura 2. Adicionalmente, dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram integrados para permitir comparações entre a irradiação medida pela estação oficial e a estimada pelo modelo desenvolvido, evidenciando a relação entre baixas irradiações e condições climáticas adversas, como alta umidade e temperaturas mais amenas. A estimativa da irradiação solar foi realizada utilizando um modelo de Multilayer Perceptron (MLP), previamente treinado e validado com dados de outras cidades do Paraná, demonstrando uma precisão média de R^2 de 92,99% (SILVA; SOUZA, 2023). O modelo MLP é composto por duas camadas ocultas com 60 e 30 neurônios, utilizando a função de ativação ReLU e o otimizador Adam, com uma taxa de aprendizado de 0,001 e regularização L2 para evitar o sobreajuste. A combinação dos dados coletados e o uso do MLP permitiram a criação de uma tabela coesa, facilitando a sincronização dos dados por data e hora e permitindo uma comparação

direta entre as estimativas do modelo e as medições reais do INMET, destacando a eficácia do protótipo desenvolvido na estimativa precisa da irradiação solar, veja na Figura 3.

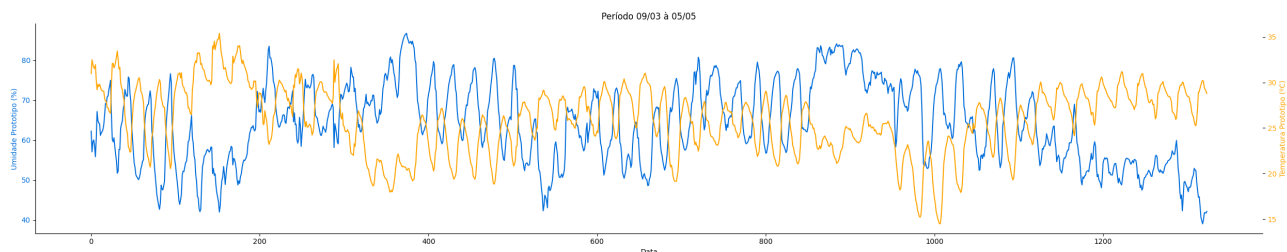


Figura 2 – Temperatura e Umidade coletadas pelo protótipo. Fonte: Autoria própria.

A etapa de comparação dos resultados envolveu a análise gráfica da irradiação solar estimada pelo modelo de Multilayer Perceptron (MLP) em comparação com os dados medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). De maneira geral, o modelo MLP capturou bem os padrões de variação da irradiação solar ao longo do tempo, apresentando similaridade nos picos e vales entre as estimativas e os valores reais. No entanto, foram observadas divergências pontuais, especialmente nos menores valores de irradiação, onde o modelo subestimou ligeiramente as medições reais. Tais discrepâncias foram atribuídas a variações climáticas rápidas e específicas da região de Cornélio Procópio, como mudanças súbitas na cobertura de nuvens. A análise quantitativa dos erros indicou um erro médio absoluto (MAE) de 0,2203, um erro quadrático médio (MSE) de 0,1381, e uma raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,3717, valores que, embora revelem algumas variações locais, são considerados relativamente baixos, demonstrando um bom desempenho geral do modelo. Com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8619, o modelo explica aproximadamente 86,19% da variância nos dados de irradiação solar, confirmando sua precisão elevada e validando sua eficácia na estimativa da irradiação solar (SILVA; SOUZA, 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho desenvolveu um protótipo acessível para a coleta de variáveis meteorológicas e a estimativa da irradiação solar utilizando o sensor DHT22 conectado ao ESP32 e técnicas de aprendizado de máquina, especificamente um modelo de Perceptron Multicamadas. As hipóteses foram validadas, demonstrando que o uso de sensores simples e de baixo custo, menos que R\$ 100,00, pode fornecer estimativas precisas da irradiação solar, com um coeficiente de determinação (R^2) de 86,19%, mesmo em condições climáticas variáveis. No entanto, foram identificadas limitações em dias de baixa irradiação, sugerindo a necessidade de melhorias no fluxo de coleta e processamento de dados. Recomenda-se, para futuras pesquisas, explorar outros modelos de aprendizado de máquina, como redes neurais profundas, e otimizar o protótipo para aumentar a frequência de amostragem e implementar mecanismos de controle de qualidade dos dados. Este estudo avança na pesquisa sobre irradiação solar e contribui para o desenvolvimento de soluções práticas e acessíveis para o monitoramento climático e

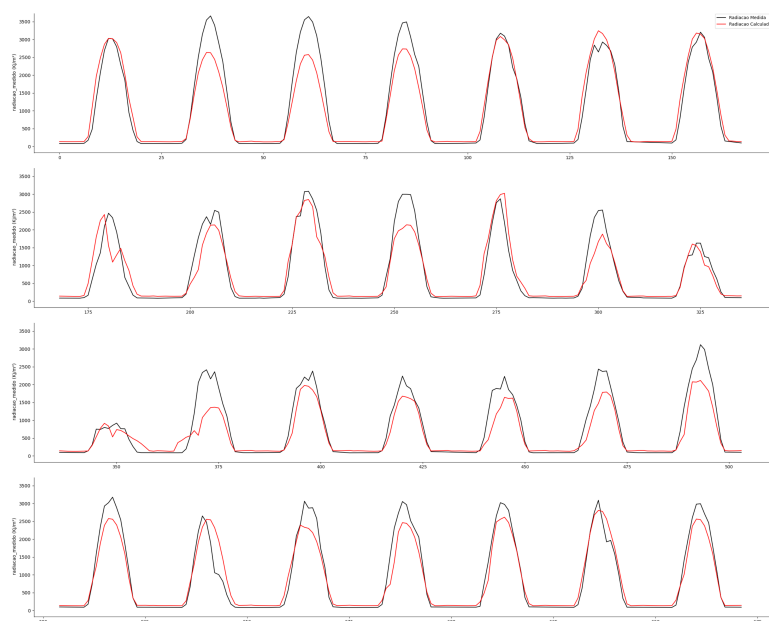


Figura 3 – Comparação da irradiação solar estimada e via INMET. Fonte: Autoria própria.

otimização de sistemas fotovoltaicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Cornélio Procopio pela possibilidade do desenvolvimento da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Yasser Asrul et al. On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application. In: 2021 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ICCCE). **2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)**. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 22 jun. 2021. P. 131–134. ISBN 9781728110653. DOI: [10.1109/ICCCE50029.2021.9467147](https://doi.org/10.1109/ICCCE50029.2021.9467147). Disponível em: [↗](#). Acesso em: 22 out. 2023.
- ALLAFI, Ibrahim; IQBAL, Tariq. Design and implementation of a low cost web server using ESP32 for real-time photovoltaic system monitoring. In: 2017 IEEE ELECTRICAL POWER AND ENERGY CONFERENCE (EPEC). **2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**. Saskatoon, SK: IEEE, out. 2017. P. 1–5. ISBN 9781538608173. DOI: [10.1109/EPEC.2017.8286184](https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286184). Disponível em: [↗](#). Acesso em: 25 ago. 2024.
- ALTASSAN, Abdulrahman. Sustainable Integration of Solar Energy, Behavior Change, and Recycling Practices in Educational Institutions: A Holistic Framework for Environmental Conservation and

Quality Education. **Sustainability**, v. 15, n. 20, p. 15157, jan. 2023. ISSN 2071-1050. DOI: [10.3390/su152015157](https://doi.org/10.3390/su152015157). Disponível em: [↗](#). Acesso em: 24 ago. 2024.

ANDRADE, José; BASCH, Gottlieb. **Clima e estado do tempo. Fatores e elementos do clima. Classificação do clima**. Universidade de Évora: ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrâneas, Escola de Ciência e Tecnologia, 2012. Disponível em: [↗](#).

BARBIERI, Gláucia M. L. et al. **Atlas Solarimétrico do Estado do Paraná**. [S.l.]: COPEL Informações, 2017. Disponível em: [↗](#). Acesso em: 23 abr. 2023.

BRAHMA, Banalaxmi; WADHVANI, Rajesh. Solar Irradiance Forecasting Based on Deep Learning Methodologies and Multi-Site Data. **Symmetry**, v. 12, n. 11, p. 1830, 5 nov. 2020. ISSN 2073-8994. DOI: [10.3390/sym12111830](https://doi.org/10.3390/sym12111830). Disponível em: [↗](#). Acesso em: 24 ago. 2024.

CASAGRANDE, Alisson; SEVERO, Tiago Cassol. Desenvolvimento de uma Estação Meteorológica com Supervisório e Base de Dados. **Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, 1 dez. 2018. ISSN 0000-0000. Disponível em: [↗](#). Acesso em: 21 out. 2023.

GÓMEZ, J.M. Rodríguez et al. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 26 mar. 2018. ISSN 1806-9126, 1806-1117. DOI: [10.1590/1806-9126-rbef-2017-0342](https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0342). Disponível em: [↗](#). Acesso em: 24 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028**. [S.l.: s.n.], 2023. Accessed: 2024-08-19. Disponível em: [↗](#).

KUMAR, Ch. Mohan Sai et al. Solar energy: A promising renewable source for meeting energy demand in Indian agriculture applications. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 55, p. 102905, fev. 2023. ISSN 22131388. DOI: [10.1016/j.seta.2022.102905](https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102905). Disponível em: [↗](#). Acesso em: 13 ago. 2024.

MOREIRA, João Carlos; SENE, Eustaquio de. **Geografia Geral e do Brasil: espaço geográfico e globalização : ensino médio: geografia: volume 1 (aluno)**. 5. ed. São Paulo: Editora Scipione, 7 out. 2021. ISBN 9788526299139.

MURPHY, Kevin P. **Machine learning: a probabilistic perspective**. Cambridge, MA: MIT Press, 2012. 1067 p. (Adaptive computation and machine learning series). ISBN 9780262018029.

ORTIZ, Maurício Soares. Plataforma baseada em sensores sem fio para o monitoramento de parâmetros meteorológicos, 15 jan. 2014. Disponível em: [↗](#). Acesso em: 21 out. 2023.

SILVA, Matheus da; SOUZA, Wesley. Analysis of Machine Learning Methods for Estimating Solar Irradiation. In: XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. [S.l.: s.n.], nov. 2023.

YNOUE, Rita Yuri et al. **Meteorologia: Noções Básicas**. Editora Oficina de Textos. São Paulo: Oficina de Textos, 4 nov. 2021. 1 v. 184 p. ISBN 9788579752636. Disponível em: [↗](#).

ZHOU, Yong et al. A review on global solar radiation prediction with machine learning models in a comprehensive perspective. **Energy Conversion and Management**, v. 235, 5 jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113960>. Disponível em: [↗](#).