

Projeto, Desenvolvimento e Testes de Piranômetros de Baixo Custo - Uma Avaliação de Acurácia e Custo

Project, Development, and Testing of Low-Cost Pyranometers - An Evaluation of Accuracy and Cost

José A. S. Avelino¹

 orcid.org/0009-0002-3015-3967

¹Escola Politécnica de Pernambuco,
Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.
E-mail: jasa@poli.br

²Escola Politécnica de Pernambuco,
Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.
Email: manoel.sacampos@upe.br

DOI: 10.25286/rep.v11i3.3934

Esta obra apresenta Licença Creative
Commons Atribuição-Não Comercial 4.0
Internacional

M. Henriques de S. C. Filho²

 orcid.org/0000-0001-9394-7540

RESUMO

A medição precisa da radiação solar é fundamental para a expansão do uso da energia solar especialmente no que diz respeito ao acesso à avaliação do recurso solar. Contudo, o alto custo dos piranômetros de precisão, dispositivos essenciais para esta avaliação, limita o acesso ao mapeamento da radiação solar nas regiões brasileiras. As instituições de pesquisa bem como as empresas do setor solar, por exemplo, poderiam realizar o mapeamento a um custo menor se houvesse uma redução dos custos de fabricação de piranômetros. Inserido no contexto acima e com o propósito de contribuir para aumentar o mapeamento da radiação solar, este trabalho propõe o desenvolvimento de um piranômetro de baixo custo, utilizando componentes acessíveis e técnicas simplificadas ao mesmo tempo em que procura obter incertezas próximas às daquelas dos piranômetros Classe A. O objetivo é democratizar essa tecnologia, permitindo sua adoção em pesquisas acadêmicas, projetos educacionais e aplicações práticas em energia solar. A metodologia inclui a seleção de materiais de baixo custo, projeto eletrônico otimizado, calibração e testes comparativos com equipamentos comerciais. Os resultados incluem não apenas a validação técnica do piranômetro, mas também a disseminação do conhecimento incentivando a replicação do projeto em outros contextos. Essa iniciativa visa reduzir barreiras financeiras, promover a inclusão tecnológica e fortalecer a formação de profissionais na área de energias renováveis. Como resultado final, o hardware utilizado e a modelagem proposta resultaram em valores baixos para as métricas estatísticas de erro, caracterizadas por: RMSE da ordem de 28,5 W/m² e nRMSE de 2,6%.

PALAVRAS-CHAVE: Piranômetro, energias renováveis, medição da irradiância horizontal global.

ABSTRACT

Accurate solar radiation measurement is fundamental for the expansion of solar energy use, especially regarding access to solar resource assessment. However, the high cost of precision pyranometers, essential devices for this evaluation, limits access to solar radiation mapping in Brazilian regions. Research institutions, as well as companies in the solar sector, for example, could carry out mapping at a lower cost if there were a reduction in pyranometer manufacturing costs. Within the above context and with the purpose of contributing to increased solar radiation mapping, this work proposes the development of a low-cost pyranometer, using accessible components and simplified techniques while seeking to obtain uncertainties close to those of Class A pyranometers. The objective is to democratize this technology, allowing its adoption in academic research, educational projects, and practical applications in solar energy. The methodology includes the selection of low-cost materials, optimized electronic design, calibration, and comparative tests with commercial equipment. The expected results include not only the technical validation of the pyranometer but also the dissemination of knowledge, encouraging the replication of the project in other contexts. This initiative aims to reduce financial barriers, promote technological inclusion, and strengthen the training of professionals in the renewable energy field. As a final result, the hardware used and the proposed modeling resulted in low values for the statistical error metrics, characterized by: RMSE on the order of 28.5W/m² and nRMSE of 2.6%.

KEYWORDS: Pyranometer, Renewable energy, Global horizontal irradiance

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade, ao longo dos últimos séculos, transformou a sociedade e impulsionou o avanço tecnológico, notadamente após o uso em larga escala da corrente alternada. Esse progresso, porém, trouxe novos desafios, como o aumento do consumo energético e a necessidade urgente de fontes sustentáveis. Nesse cenário, a energia solar se destaca como uma alternativa promissora. Segundo a agência The International Renewable Energy Agency - IRENA o custo dos painéis fotovoltaicos caiu mais de 80% na última década, estimulando um crescimento médio anual de 25% na capacidade instalada global [1]. No Brasil, o potencial é ainda maior, com irradiação média de 5,4 kWh/m²/dia, superando países europeus líderes no setor [2].

Apesar disso, persiste um entrave: o alto custo dos equipamentos de medição, especialmente piranômetros, que podem ultrapassar R\$ 7.500,00 no mercado nacional. Esses dispositivos são essenciais para quantificar com precisão a radiação solar (W/m²), mas permanecem inacessíveis para muitas instituições de ensino e pequenos projetos. Isso limita a formação de profissionais qualificados e o avanço de pesquisas em energia solar.

2. OBJETIVO

O presente trabalho surge como resposta a este desafio, propondo o desenvolvimento de um piranômetro de baixo custo que mantenha padrões adequados de precisão e acurácia.

Ao criar uma alternativa economicamente viável, este projeto visa não apenas suprir uma necessidade técnica, mas principalmente contribuir para a formação de profissionais melhor qualificados e para o avanço de pesquisas em energia solar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um piranômetro é um instrumento científico utilizado para medir a irradiância solar global em uma superfície plana ou inclinada, expressa em watts por metro quadrado (W/m²). São úteis para o mapeamento do recurso solar, permitindo uma compreensão mais profunda e minuciosa das variações sazonais e geográficas da irradiância, [3]. Os piranômetros operam com base no princípio termoeletrico, onde um sensor termopilha converte

a radiação solar em um sinal elétrico proporcional à intensidade da luz incidente [4].

3.1 PRINCIPAIS SENSORES UTILIZADOS EM PIRANÔMETROS

Os piranômetros, instrumentos que convertem a energia solar incidente em um sinal mensurável. Existem, duas categorias principais de piranômetros, que se distinguem por seus princípios de funcionamento.

3.1.1 PIRANÔMETROS DE TERMOPILHA:

O piranômetro de termopilha é um instrumento que mede a irradiância solar global, que é a soma das radiações direta e difusa, por meio de um sensor baseado no efeito termoeletrico. Esta termopilha é revestida com uma tinta preta especial que simula um "corpo negro", absorvendo praticamente toda a radiação incidente e convertendo-a em calor. Esse calor gera uma diferença de potencial elétrico proporcional à radiação solar recebida [5].

3.1.2 PIRANÔMETROS DE FOTODIÓDOS:

O piranômetro de fotodiodo utiliza uma célula semicondutora (fotodiodo) para converter diretamente a radiação solar em corrente elétrica. No entanto, sua resposta espectral não é plana, o que pode introduzir variações nas medições conforme as condições atmosféricas (céu claro ou nublado).

Para ilustrar os piranômetros baseados em fotodiodos. De acordo com seus valores nominais publicados pelo fabricante, tem sensibilidade de cerca de 75 µA por 1000 W/m², e fornece medições proporcionais à radiação solar. Possui alta linearidade, com desvio máximo de 1% até 3000 W/m², e tempo de resposta inferior a 1 µs. Além disso, mantém precisão mesmo com variações térmicas (±0,15% por °C) e não é afetado pela inclinação na instalação [6].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

A Figura 1 e 2, representam a estrutura do Hardware proposto para o protótipo. O Projeto consiste em 2 sensores: UV040-BG (Fotodiodo) e Mini Célula Fotovoltaica. Possui 4 Leds para indicar status e alertas, 3 circuitos para o condicionamento de sinal e um microcontrolador de baixo consumo (ESP32), permitindo comunicação eficiente com os servidores IoT (Internet of Things) e o um modulo RTC (Real Time-Clock) com Entrada SD para o armazenamento dos dados.

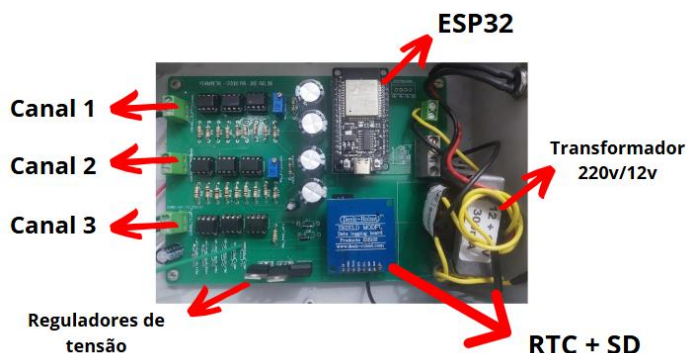
Na figura 2, O protótipo é encapsulado em um caixa retangular de 190mm de comprimento, 150mm de largura e 90mm de altura. Fabricada em material de polímero plástico resistente e projetada para ambientes externos. A estrutura possui proteção IP68, garantindo a impermeabilidade e resistência a poeira.

Figura 1 – Protótipo do piranômetro de baixo custo



Fonte: Autor

Figura 2 – Representação do HARDWARE com auxílio de software



Fonte: Autor

4.2 SENSORES DE RADIAÇÃO

4.2.1 PIRANÔMETRO PADRÃO - **CMP11** **FABRICANTE:** KIPP & ZONEN SMART PYRANOMETER

O CMP11, é um piranômetro de alta precisão da Kipp & Zonen, foi escolhido como referência para a calibração do protótipo de baixo custo, garantindo dados confiáveis. Projetado para operar em condições adversas, o CMP11 oferece proteção contra flutuações de tensão, inversão de polaridade e curtos-circuitos, além de um sistema ótico de 180° para medições precisas, sendo ideal para aplicações meteorológicas e monitoramento de usinas solares [7].

4.2.2 MINI CÉLULA FOTOVOLTAICA

A mini célula fotovoltaica com o tamanho de 53 mm por 30mm. É um modulo compacto projeto para aplicações de baixa potência onde espaço e peso são fatores críticos.

Embora sua potência seja 0,21W, sua versatilidade o torna adequado para uma ampla gama de dispositivos autônomos e sistemas de baixo consumo. Sua escolha foi fundamentada nas características listadas no DataSheet [8].

4.2.3 FOTODIODO UV-040BG:

É um sensor de fotodiodo de silício projetado para a detecção de radiação solar global e luz visível. Ele é um sensor com a área ativa de 0,81mm² (diâmetro de 1,0 mm) [9].

É amplamente utilizado em instrumentos de medição de radiação solar. Consegue realizar as medições da irradiância solar global [10]. Bastante utilizado em Instrumentação Científica, Análise de eficiência de painéis solares, Pesquisa Climatológica.

4.3 CONDICIONAMENTO DO SINAL

Para realizar a montagem do aplicador operacional de instrumentação foram utilizado três circuitos integrados – OP07, mostrado na figura 3. A escolha por esse amplificador operacional ocorreu devido a ampla faixa de tensão de alimentação: $\pm 3V$ a $\pm 22V$, Faixa de temperatura de operação de

-40°C a 105°C e alta disponibilidade no mercado e baixo custo [11].

Já no Canal 2, com um trimpot de 50 kΩ, o ganho estimado com a Equação (1) varia entre 1 á 6 vezes maior do que a entrada. Para ambos os canais, a tensão de saída foi calculada com base na Equação (1). Segundo o datasheet da mini célula fotovoltaica [7], sua tensão máxima é 5,28V. Utilizando a Equação (2), foi calculado o ganho teórico dos dois circuitos: Canal 1 (UFV) e Canal 2 (UV040-BG). No Canal 1, com os componentes da Figura 3, obteve-se um ganho de 1,06 vezes maior do que a entrada. Aplicando a Equação (2) com os valores da Figura 3, a saída atinge o máximo de 5,46V. A Equação (3), de divisor de tensão, foi usada para ajustar esse valor para 2,85V. No Canal 2, com fotodiodo de silício, a tensão máxima é de 0,58V. Com o trimpot de 50 kΩ e os componentes da Figura 3, o ganho foi ajustado para obter também 2,85V na saída. As saídas analógicas foram projetadas para a limitação de 3,3V considerando que a tensão limite dos conversores AD do ESP32 utiliza a tensão máxima de 3,3V e foram utilizados amplificadores operacionais de instrumentação por suas características essenciais: alta impedância de entrada, baixa impedância de saída, boa rejeição ao modo comum e baixa distorção [12] e aprimorar as características para conseguir mais acurácia e confiabilidade nas medições [13].

$$v_o = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_g} \right) (v_1 - v_2) \quad (1)$$

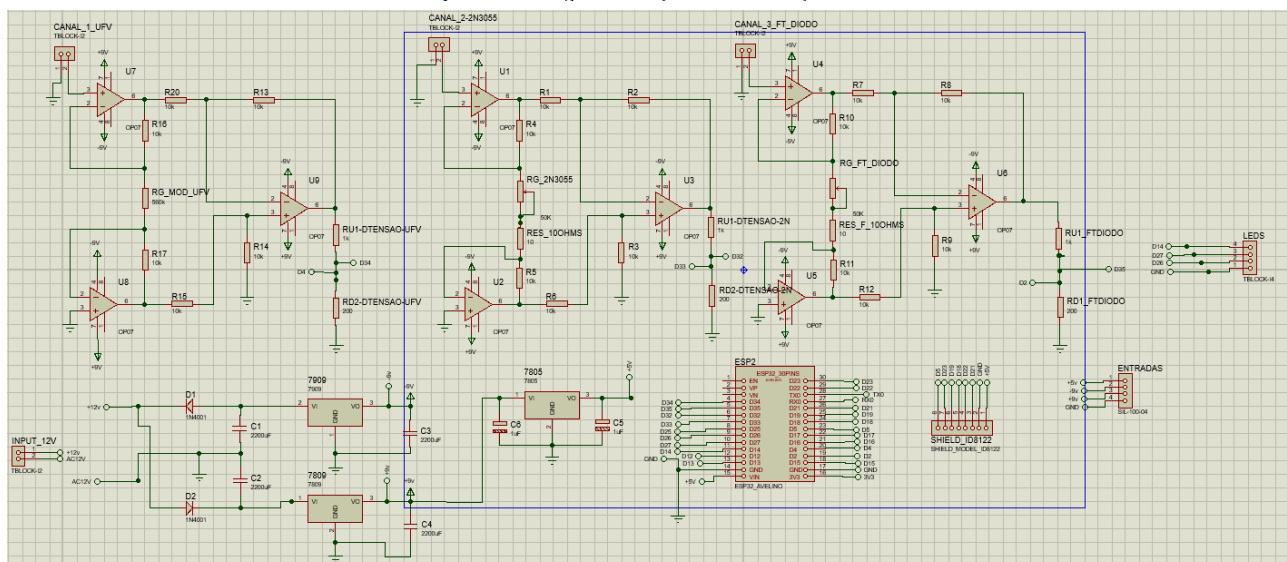
$$A_v = 1 + \frac{2R_2}{R_g} \quad (2)$$

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

4.4 CALIBRAÇÃO

No estudo, utilizou-se o Datalogger CR1000X da Campbell Scientific, capaz de registrar, processar e armazenar dados de múltiplos sensores simultaneamente. Com conversores analógicos de 16 bits e compensação automática de temperatura, oferece medições confiáveis. Possui 8 canais analógicos, 16 digitais e memória interna de 4 MB, operando em temperaturas de -40 °C a +70 °C [14]. Os sensores, incluindo uma mini célula fotovoltaica e um fotodiodo, foram estrategicamente posicionados ao lado de um piranômetro comercial calibrado, que serviu como referência. O datalogger foi responsável por capturar todos esses dados. As informações coletadas serão posteriormente utilizadas para a aplicação de regressões lineares simples e polinomiais, com o objetivo de modelar as relações observadas. A utilização de um piranômetro padrão é crucial, pois válida a importância da calibração para a otimização de sistemas de energia solar e para o aprimoramento das técnicas de medição de irradiação.

Figura 3 – Diagrama Esquemático completo



Fonte: Autor

Este processo rigoroso assegura a confiabilidade dos dados e dos modelos desenvolvidos, permitindo avaliações mais precisas da energia solar [15].

4.5 DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES NO EQUIPAMENTO

Os componentes eletrônicos deste projeto foram instalados em uma caixa com proteção IP68, garantindo que apenas os sensores ficassem expostos fora da caixa para ser realizada a medição da radiação solar global horizontal.

5. MÉTRICAS ESTATÍSTICAS

Para os dois sensores, mini Célula Fotovoltaica e UV040-BG, foram testados dois modelos: regressão linear simples e regressão polinomial cúbica. Ambos foram utilizados para modelar a irradiância solar com base nas medições de referência realizadas pelo piranômetro padrão. O MSE (Erro Quadrático Médio) e o RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio) medem a diferença média entre o que o modelo previu e o valor real, com o RMSE tendo a vantagem de estar na mesma unidade da medida que estava prevendo, facilitando a interpretação. Já o MAE (Erro Médio Absoluto) também calcula a média dos erros, mas sem elevá-los ao quadrado, tornando-o menos sensível a valores muito discrepantes. Para comparar o desempenho dos seus modelos em diferentes contextos, foi utilizado as versões normalizadas dessas métricas: o nRMSE e o nMAE, que dividem o erro por uma referência, como a média dos dados, transformando-o em uma porcentagem. Por fim, o R^2 (Coeficiente de Determinação) é um valor entre 0 e 1 que indica o quanto o modelo consegue explicar a variação nos dados reais. Quanto mais próximo de 1, melhor o modelo se ajusta. Essas métricas, juntas, dão uma visão completa da precisão e confiabilidade das previsões.

6 RESULTADOS

O Protótipo, localizado na Figura 4, foi posicionado em Recife no estado de Pernambuco na área de testes do grupo FAE-DEN-UFPE. O protótipo foi instalado ao lado de um piranômetro da série CMP11 classe A, com o objetivo de realizar calibração. Ambos os instrumentos foram colocados sobre uma superfície plana e horizontal, que ficou exposta ao sol, desde o amanhecer até o entardecer.

Figura 4 – Disposição CMP11 e do protótipo na área de teste



Fonte: Autor

Para determinar a irradiância solar global é registrada a tensão correspondente em milivolts, nos terminais de saída de cada sensor. Esse sinal elétrico é enviado para um sistema de aquisição de dados, conhecido como datalogger da marca CAMPBELL. Fornecendo em uma planilha dos dados de tensão dos 2 sensores que estamos utilizando: UV040-BG e a mini célula fotovoltaica juntamente com o valor de irradiância obtido pelo piranômetro de referência, CMP 11, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo numérico de tabela de dados obtidos pelo Datalogger

	MiniCelulaUFV	FotoDiodo: UV040-BG	PIRANÔMETRO_PADRÃO CMP11
Unidade	mV	mV	W/m ²
Data e Hora			
05/05/2025 09:39	2270	2613	968
05/05/2025 09:40	2130	2394	908
05/05/2025 09:41	2283	2698	974
05/05/2025 09:42	1975	2258	849
05/05/2025 09:43	1901	2219	818

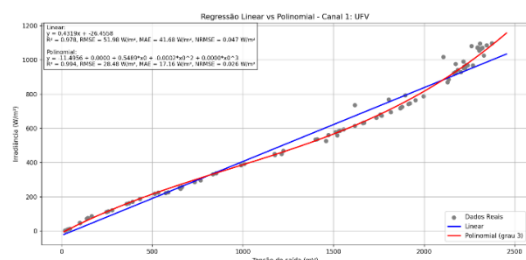
Fonte: Autor

Para as métricas estatísticas foram utilizados um conjunto total de 455 amostras coletadas. Utilizando a técnica de divisão de dados (data splitting), com uma proporção de 80% para o conjunto de treinamento e 20% para o de testes, 364 amostras foram usadas no treinamento dos modelos de regressão, enquanto as 91 amostras restantes foram destinadas à avaliação do desempenho dos modelos desenvolvidos. Para ambos os sensores, Canal 1: UFV e Canal 2: UV040BG, foi obtido duas equações: regressão linear simples e a regressão polinomial cúbica.

6.1 CANAL 1 – UFV: MINI CELULA FOTOVOLTAICA

Para o conjunto de dados analisado no Canal 1, foram aplicados dois modelos de regressão com o objetivo de descrever o comportamento da irradiância do piranômetro padrão em função da variável independente que são os sensores com a saída de tensão sendo em milivolts: a regressão linear simples e a regressão polinomial cúbica. Na Figura 5, a regressão linear simples resultou na seguinte equação: $y = 0,4319x - 26,4558$. Para validação dos dados foram utilizadas métricas estatísticas, conforme a Tabela 5. A regressão apresentada na Figura 5 pode ser observada em maior detalhe no link.

Figura 5 – Regressão: Linear x Polinomial – Canal 1 : UFV (<https://tinyurl.com/39e3j3ky>)



Fonte: Autor

Contudo, verificou-se que o comportamento dos dados revelava uma dinâmica mais elaborada, motivo pelo qual foi aplicada uma regressão polinomial de grau 3 (cúbica). A equação obtida foi: $y = -11,4956 + 0,548861x + 0,0002338x^2 + 0,0000000831x^3$.

Este modelo permite capturar variações mais sutis, o que pode melhorar a precisão do ajuste em comparação com o modelo linear simples. Para validação dos dados da regressão linear polinomial foram utilizados métricas estatísticas, conforme da tabela 5.

Em resumo, o modelo polinomial cúbico se mostra claramente mais eficaz conforme podemos observar nas tabelas 2 e 3. A redução substancial dos erros de previsão, conforme foi demonstrado evidencia que a inclusão de termos não lineares se faz mais vantajosa, quando se busca maior precisão nos dados.

Tabela 2 – Métricas Estatísticas para a regressão linear simples – CANAL 1: UFV

Indicador	Valor
Coefficiente de determinação (R^2)	0,9785
MSE (Erro Quadrático Médio)	2.701,92 (W/m^2) ²
RMSE (Raiz quadrada do MSE)	51,98 W/m^2
nRMSE (RMSE normalizado pelo valor médio)	4,74%
MAE (Erro Absoluto Médio)	41,67 W/m^2
nMAE (MAE normalizado pelo valor médio)	3,80%

Fonte: Autor

Tabela 3 – Métricas Estatísticas para a regressão linear polinomial – CANAL 1: UFV

Indicador	Valor
Coefficiente de determinação (R^2)	0,9935
MSE (Erro Quadrático Médio)	810,85 (W/m^2) ²
RMSE (Raiz quadrada do MSE)	28,47 W/m^2
nRMSE (RMSE normalizado pelo valor médio)	2,60%
MAE (Erro Absoluto Médio)	17,16 W/m^2
nMAE (MAE normalizado pelo valor médio)	1,57%

Fonte: Autor

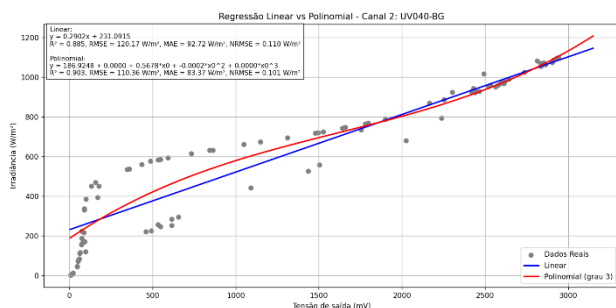
6.2 CANAL 2 – UV040BG

No Canal 2, identificado como UV040-BG, também foram aplicados dois tipos de regressão: linear simples e polinomial cúbica. Na Figura 6, a regressão linear simples resultou na seguinte equação: $y = 0,2902x + 231,0915$.

Para validação dos dados foram utilizadas métricas estatísticas, conforme a Tabela 4.

Observou-se também que os dados exibiram maior detalhamento, motivo pelo qual foi aplicada uma regressão polinomial de grau 3 (cúbica). A equação obtida foi: $y = 186,9248 + 0,5678189849x - 0,0002214393x^2 + 0,0000000457x^3$

Possibilita identificar variações mais delicadas nos dados, o que pode contribuir para um ajuste mais preciso em relação ao modelo linear simples. A validação dos resultados obtidos pela regressão polinomial foi realizada por meio de métricas estatísticas, conforme apresentado na Tabela 5. A regressão apresentada na Figura 6 pode ser observada em maior detalhe no link.

Figura 6 – Regressão linear X Polinomial – Canal 2 – UV040-BG (<https://tinyurl.com/39e3j3ky>)

Fonte: Autor

Tabela 4 – Métricas Estatísticas para a regressão linear simples

Indicador	Valor
Coefficiente de determinação (R^2)	0,8851
MSE (Erro Quadrático Médio)	14.441,04 (W/m ²) ²
RMSE (Raiz quadrada do MSE)	120,17 W/m ²
nRMSE (RMSE normalizado pelo valor médio)	10,97%
MAE (Erro Absoluto Médio)	92,72 W/m ²
nMAE (MAE normalizado pelo valor médio)	8,46%

Fonte: Autor

Tabela 5 – Métricas Estatísticas para a regressão linear polinomial

Indicador	Valor
Coefficiente de determinação (R^2)	0,9030
MSE (Erro Quadrático Médio)	12.179,34 (W/m ²) ²
RMSE (Raiz quadrada do MSE)	110,36 W/m ²
nRMSE (RMSE normalizado pelo valor médio)	10,07%
MAE (Erro Absoluto Médio)	83,36 W/m ²
nMAE (MAE normalizado pelo valor médio)	7,61%

Fonte: Autor

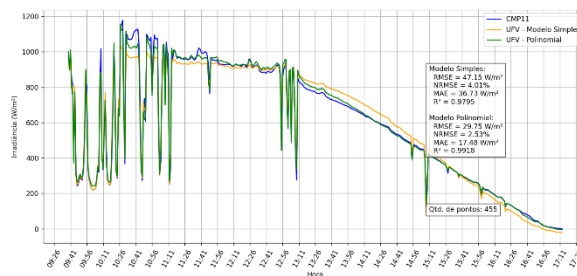
As regressões polinomiais dos canais 1 e 2 mostraram bons resultados, mas o Canal 1 (UFV) apresentou desempenho superior. Seus valores de R^2 foram mais altos e os erros (RMSE, nRMSE e MAE) menores, indicando maior precisão na estimativa dos dados. Assim, o modelo polinomial aplicado ao Canal 1 foi mais eficaz na representação da irradiância.

6.3 VALORES DA IRRADIÂNCIA: ANÁLISE COMPARATIVA.

A validação da precisão e confiabilidade de métodos de medição de irradiância solar é crucial para sua aplicação em contextos reais. Esta seção dedica-se à análise comparativa dos valores de irradiância obtidos pelo protótipo em relação a um padrão de referência. O objetivo é quantificar os modelos propostos frente a um instrumento calibrado, permitindo uma avaliação acurada de seu desempenho em condições operacionais.

6.3.1 VALORES DE IRRADIÂNCIA – PROTOTIPO X CMP11 [PIRANÔMETRO COMERCIAL]

O gráfico da Figura 7 apresenta os dados reais de irradiância do piranômetro CMP11 (linha azul) com as previsões de dois modelos baseados na UFV: simples (linha laranja) e polinomial (linha verde). A irradiância (W/m²) varia ao longo do dia, das 09h30 até o 17h10. Observa-se maior instabilidade no período da manhã, devido a variações rápidas pela passagem de nuvens. As curvas de irradiância apresentada na Figura 7 pode ser observada em maior detalhe no link.

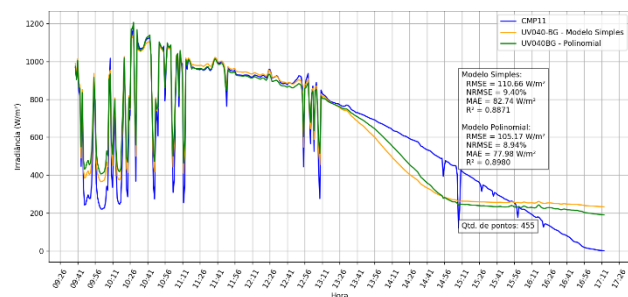
Figura 7 – Curvas de irradiância – CANAL 1: UFV x CMP11 (<https://tinyurl.com/39e3j3ky>)

Fonte: Autor

O gráfico da Figura 8 apresenta os dados reais de irradiância do piranômetro CMP11 (linha azul) com as previsões dos modelos simples (linha laranja) e polinomial (linha verde), baseados no piranômetro padrão. A irradiância varia ao longo do dia, das 09h30 até as 17h10. O CMP11, usado como referência, apresenta oscilações mais intensas causadas por mudanças na cobertura de nuvens. Ambos os modelos acompanham essas variações, com o polinomial mostrando um desempenho ligeiramente superior, conforme indicam as métricas de erro. As curvas de irradiância apresentada na Figura 8 pode ser observada em

maior detalhe no link.

Figura 8: Curvas de irradiância – CANAL 2: UV040BG x CMP11 (<https://tinyurl.com/39e3j3ky>)



Fonte: Autor

Um estudo recente avaliou a sensibilidade e acurácia de quatro transdutores optoeletrônicos – dois fototransistores (BP103 e SFH3310) e dois fotodiodos (BPW21 e BPW34). No Canal 1, mini célula fotovoltaica, referente a Tabela 6 revelou um coeficiente de determinação (R^2) de 0.9935. Esse valor é excepcionalmente alto e se mostra bastante competitivo com os melhores transdutores otimizados do artigo [16]. Do qual, supera os valores obtidos para o BPW34 ($R^2 = 0.9916$) e o SFH3310 ($R^2 = 0.9905$). Os resultados da mini célula fotovoltaica ficou abaixo do BP103 ($R^2 = 0.9976$), o transdutor de melhor desempenho. Por outro lado, os resultados da Tabela 8, canal 2: fotodiodo, indicam uma maior incerteza em comparação com os dados da Tabela 6, canal 1: mini célula fotovoltaica.

6.4 CUSTOS

No cenário atual da pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis, há um esforço notável para diminuir o custo dos piranômetros, essenciais para a medição da irradiação solar [17]. Um exemplo desse esforço é o protótipo desenvolvido, que apresenta um custo de R\$ 600,23. Este valor é significativamente menor quando comparado aos equipamentos comerciais mais acessíveis, mesmo considerando as diferenças construtivas. A projeção é que, com a produção em escala, esse custo possa ser ainda mais reduzido, tornando a tecnologia de medição de irradiação solar mais acessível. A Tabela 6 oferece uma detalhada comparação dos preços dos piranômetros comerciais, reforçando a vantagem econômica do protótipo desenvolvido

Tabela 6 – Preço dos piranômetros comerciais (<https://tinyurl.com/5yfy5k8e>)

Descrição dos equipamentos	Código	Preço total
PIRANÔMETRO DIGITAL - CLASSE A	MS80SH	R\$ 39.018,53
PIRANÔMETRO DIGITAL - CLASSE A	SR200-D1-05	R\$ 28.136,78
PIRANÔMETRO DIGITAL - CLASSE B	SR100-D1-05	R\$ 21.511,29
PIRANÔMETRO DIGITAL - CLASSE C	SR05-D1A3-BL01-05	R\$ 7.362,24
Datalogger - FIELDLOGGER	8812120000	R\$ 6.601,76
Protótipo - ANASEV25		R\$ 600,56

Fonte: Autor

7 CONCLUSÕES

O dispositivo apresentou resultados satisfatórios, sendo capaz de medir a irradiância solar global horizontal por meio de dois sensores: uma mini célula fotovoltaica e um fotodiodo UV040-BG, gerando as curvas de irradiância apresentadas nas Figuras 7 e 8. Os resultados obtidos demonstram confiabilidade, com base nas métricas estatísticas das Tabelas 3 e 5, que indicaram baixa porcentagem de erro (nRMSE e nMAE), especialmente considerando que se trata de um protótipo, com potencial de obter resultados superiores através da utilização de sensores ainda mais acurados. Para a redução de custos, pode-se considerar a utilização apenas do sensor que apresentou os melhores resultados — no caso, a mini célula fotovoltaica. Além disso, recomenda-se a implementação de monitoramento em nuvem e o aprofundamento em pesquisas como a resposta à inclinação do plano em que é posicionado o piranômetro. Para diminuir a taxa de erro, seria interessante estender o período de coleta de dados, possibilitando a captação de um número maior de pontos. Adicionalmente, a aplicação de modelos que fazem uso de machine learning pode contribuir para uma diminuição ainda maior dos erros, aprimorando a precisão das medições. Através da incorporação do Microcontrolador ESP32 ao circuito, Figura 2, torna-se possível monitorar a irradiância global horizontal diária, fornecendo dados para a avaliação local do recurso solar a ser utilizado em pesquisas ou em projetos de plantas solares. Analisando brevemente o mercado de piranômetros, conforme a Tabela 6, observa-se um alto custo para equipamentos de referência. O modelo MS80SH (Classe A) possui um custo estimado de R\$ 39.018,53, enquanto o SR100-D1 (Classe B) fica em torno de R\$ 21.511,29 e o SR05 (Classe C), aproximadamente, R\$ 7.362,24.

Finalmente, observando, em um cenário comparativo, o protótipo desenvolvido alcançou excelentes resultados, com desvio por RMSE de apenas 28,47 W/m² - valor esse abaixo do patamar de erro máximo da classe C, 30 W/m², como simples referência, ao passo que seu custo estimado de fabricação foi de somente R\$ 600,56. Esta expressiva redução de custos, aliada a um desempenho bastante satisfatório, posiciona o protótipo como uma alternativa viável e com bom potencial para contribuir com a expansão do mapeamento da radiação solar.

8 REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Record Growth Drives Cost Advantage of Renewable Power**. Abu Dhabi, 2024.
Disponível em: <<https://tinyurl.com/mrh74fn6>>
Acesso em: 1 maio 2025.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Energia solar acessível para todos**. [S. l.], 2024.
Disponível em: <<https://tinyurl.com/bddjx8y4>>.
Acesso em: 1 maio 2025.
- [3] PALMIERI, Anderson Marcelli. **Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para coleta e armazenamento de dados de variáveis climáticas: aplicações no ambiente agrícola**. 2009.
Disponível em: <<https://tinyurl.com/4ch2a56u>>. Acesso em: 1 maio 2025.
- [4] BARBOSA, Caio Henrique Silva et al. **Instalação do piranômetro solar: um guia completo**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1-12, 2024.
Disponível em: <<https://tinyurl.com/mhtbkkn5>> .
Acesso em: 2 maio 2025.
- [5] SANTOS, Nara Tosta. **Avaliação de piranômetros em condições de campo e estimativa do balanço de radiação em área de gramínea com grau de cobertura variável**. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2015.
Disponível em: <https://tinyurl.com/mr2hrkcp>.
Acesso em: 2 maio 2025.
- [6] LI-COR Biosciences. **LI-200R Pyranometer Datasheet**. [S.l.], [2022]. Disponível em: <https://tinyurl.com/ffhwbmvw>.
Acesso em: 5 maio 2025.
- [7] CAMPBELL SCIENTIFIC. **CMP Series Pyranometer Manual**. [S.l.], [2015]. Disponível em: <https://tinyurl.com/yc7dh3f3>.
Acesso em: 5 maio 2025.
- [8] AMX3D Solar. **Product Data Sheet - 53x30 Solar Panel**. [S.l.], [2021]. Disponível em: <https://tinyurl.com/373595mu>. Acesso em: 5 maio 2025.
- [9] EG & G JUDSON. **UV040-BG Photodiode Datasheet**. [S.l.], [1992]. Disponível em: <https://tinyurl.com/mr3fex6d>. Acesso em: 5 maio 2025.
- [10] ZHOU, C.; MICHALSKY, J. **Spectral correction of silicon photodiode solar radiation detectors**. TN: OSTI, 1996. Disponível em: <https://tinyurl.com/2wf8bra4>. Acesso em: 5 maio 2025.
- [11] ANALOG DEVICES. **OP07 Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier Datasheet**. [S.l.], rev. G, 2023. Disponível em: <https://tinyurl.com/yc7awstj>. Acesso em: 5 maio 2025..
- [12] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. Amplificadores operacionais e circuitos integrados lineares. *Microeletrônica*. 5. ed. Tradução de Arlete Simille Marques. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. **Cap. 2**, p. 55.
- [13] STATE UNIV. OF NEW YORK, Albany. Atmospheric Sciences Research Center. **Spectral correction of silicon photodiode solar radiation detectors**. In: SOLAR '94: AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY CONFERENCE, 1994, San Jose, CA. Anais [...]. Albany, NY: State Univ. of New York, Atmospheric Sciences Research Center. (Report Number: DOE/ER/61072-14). Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/377500>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- [14] CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR1000 Measurement and Control System -**

Operator's Manual. 2012. [S.l.], [2015].
Disponível em: <https://tinyurl.com/5h4x4e6f>.
Acesso em: 5 maio 2025.

- [15] ALKHATIB, H. et al. **Calibration of solar pyranometers for accurate solar irradiance measurements: A data set from the pre- and post-calibration process.** v. 59, p. 111402, 2025.
- [16] ONATOYINBO, O. O. **Comparison of the sensitivities of four photoelectric transducers for irradiance meter.** 2022. Tese (MPhil) – Department of Physical Sciences, Faculty of Natural Sciences, Redeemer's University, Ede, Nigeria, 2022.
- [17] ANSANATO, C. et al. **LOW COST THERMAL PYRANOMETER USING DALLAS DS18B20 SENSOR AND ARDUINO.** In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 17., 2018, Águas de Lindóia, SP.
- [18] Maxim Integrated. **DS3231 Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal Datasheet.** [S.l.], [2010].
Disponível em: <https://tinyurl.com/2wdk5xyu>.
Acesso em: 5 maio 2025..
- [19] CAMPBELL SCIENTIFIC. **CMP11 Pyranometer.** [S.l.], [2015].
Disponível em: <https://tinyurl.com/vyc9ptr>.
Acesso em: 5 maio 2025.
- [20] CAMPBELL SCIENTIFIC. **CMP Series Pyranometer Manual.** [S.l.], [2015].
Disponível em: <https://tinyurl.com/yc7dh3f3>.
Acesso em: 5 maio 2025.
- [21] CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR1000 Measurement and Control System – Operator's Manual. 2012.** [S.l.], [2015].
Disponível em: <https://tinyurl.com/5h4x4e6f>.
Acesso em: 5 maio 2025.
- [22] ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Technical Reference Manual.** [S.l.], 2021. Disponível em: <https://tinyurl.com/mwbxd26y>. Acesso em: 5 maio 2025.
- [23] EPPLEY LABORATORY, Inc. **PSP – Precision Spectral Pyranometer:** instruction manual. Newport, RI: Eppley Laboratory, [s.d.]. Disponível em: <https://tinyurl.com/5yfcnyub>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [24] THINGSBOARD. **ThingsBoard: open-source IoT platform.** [S.l.]: ThingsBoard Authors, [s.d.]. Disponível em: <https://thingsboard.io/>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [25] TAYLOR, John R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements.** Mill Valley: University Science Books, 1997.
- [26] SILVEIRA, Rodrigo Andrade da; DOMINGOS, Samira Fontes; RESENDE, Lucas Lourenço Reis; BOAVENTURA, Wallace do Couto; OLIVEIRA, Luís Guilherme Monteiro de; FRANCO, José Rafael. **Medição da irradiância solar global em plano inclinado utilizando sistema embarcado de baixo custo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 10., 2024, Natal. Anais do X Congresso Brasileiro de Energia Solar]. Natal, 2024.
- [27] NAVA-PINTOR, Jesús Antonio et al. **Development and Evaluation of Solar Radiation Sensor Using Cost-Effective Light Sensors and Machine Learning Techniques.** Technologies, Basel, v. 13, n. 5, p. 182, maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies13050182>.
- [28] PERKASA, S. D.; SYAHBANI, M. A.; MEGANTORO, P. Analysis of instrumentation system for photovoltaic pyranometer used to measure solar irradiation level. *Elektrika: Journal of Electrical Engineering*, Disponível em: <https://tinyurl.com/5y4c9j2e>. Acesso em: 5 maio 2025.
- [29] MORAIS, Francisco Hedler Barreto de Lima. **Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico de 5,2 kWp conectado à rede instalado na UECE.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://tinyurl.com/ykukbmtf>. Acesso em: 31 maio 2025.