Sensor de Irradiância: Estimativa Através da Corrente, Tensão e Temperatura do Módulo Fotovoltaico

Arion H. A. R. T. S. Clementino * **Igor S. O. Freitas** ** **Leandro A. Vasconcelos** ***

* *Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, MG, (e-mail: ahsar@aluno.ifnmg.edu.br).*
** *Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, MG, (e-mail: igor.freitas@ifnmg.edu.br)*
*** *Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, MG, (e-mail: leandro.vasconcelos@ifnmg.edu.br)*

Abstract: Brazil is growing in photovoltaic solar energy generation, driven by various power plants across different regions. However, smaller generation points lack adequate equipment to monitor atmospheric and climatic factors affecting photovoltaic generation. To address this, this study aims to develop a cost-effective tool for estimating irradiance, crucial for determining electrical power generation. The proposed solution involves a prototype utilizing a 10W module as a reference cell, connected to sensors measuring voltage, current, and temperature, all controlled by an *Arduino* device. This tool will enable studies on irradiance levels, their variations throughout the day and across locations, facilitating optimization of module positioning, evaluation of power generation, fault detection, and determining cleaning frequency.

Resumo: O Brasil está passando por um crescimento na geração de energia solar fotovoltaica, impulsionado por várias usinas em diferentes regiões. No entanto, unidades de menor geração carecem de equipamentos adequados para monitorar fatores atmosféricos e climáticos que afetam a geração fotovoltaica. Para resolver isto, este estudo visa desenvolver uma ferramenta de baixo custo para estimar a irradiância, crucial para determinar a geração fotovoltaica. A solução proposta envolve um protótipo que utiliza um módulo de $10W$ como célula de referência, conectado a sensores que medem tensão, corrente e temperatura, todos controlados por um dispositivo *Arduino*. Esta ferramenta possibilitará estudos sobre os níveis de irradiância, suas variações ao longo do dia e em diferentes locais, facilitando a otimização do posicionamento do módulo, avaliação da geração de energia, detecção de falhas e determinação da frequência de limpeza dos módulos.

Keywords: Photovoltaic solar energy; solar sensor; reference cell; evaluation of generated power; low-power generation; performance; Arduino sensor.

Palavras-chaves: Energia solar fotovoltaica; sensor solar; célula de referência; avaliação da potência gerada; geração de baixa potência; desempenho; sensor Arduino.

1. INTRODUÇÃO

A Energia proveniente do sol apresenta alta variabilidade de geração em razão da influência de fatores externos, como: condições meteorológicas locais; latitude; movimento orbital e rotação da Terra; proximidade à regiões costeiras e elevção do terreno são alguns exemplos que compõe este grupo de fatores influentes, Program (2020).

Desta forma, diante de tantas variáveis que podem alterar a geração fotovoltaica, compreender a incidência e monitorar os níveis de radiação são tarefas de fundamental importância para maximizar a potência gerada por esta fonte, de acordo com Rabaia et al. (2021).

Um método de se mensurar a radiação solar é na forma da irradiância (G), conceito que define a potência contida na radiação solar que incide em uma área de um metro quadrado, sendo expressa na unidade de medida $Watt/metro^2, W/m^2$.

Esta grandeza se relaciona diretamente com a geração da unidade fotovoltaica por meio de uma proporção direta em relação à correte fotogerada. Portanto, torna-se possível a estimativa, através da referida corrente, da irradiância incidente no módulo fotovoltaico.

Dada a importância deste fenômeno, grandes centrais geradoras dispõem de um vasto aparato ferramental em estações meteorológicas para monitoramento do clima e condições atmosféricas, com destaque para o piranômetro, equipamento de alta precisão que estima a irradiância através da dilatação de lâminas bimetálicas.

No entanto, a abordagem mencionada demanda um alto investimento em equipamentos e em profissionais capacitados para sua operação, o que pode se tornar um desafio para pequenos geradores, conforme Martins et al. (2017).

Visando esta parcela de menores geredores de energia solar fotovoltaica, surge, então, a iniciativa de se elaborar um instrumento que seja capaz de estimar os valores de irradiância, apresentando precisão próxima a instrumentos profissionais de medição, e que possa ser empregado em unidades geradoras de menor investimento.

Estas unidades de menor potência, como residências e pequenos complexos fotovoltaicos, se beneficiaram com a diminuição dos preços da tecnologia fotovoltaica, Sens et al. (2022). No entanto, o investimento para uma estrutura mais robusta de monitoramento pode apresentar uma ameaça à sua própria viabilidade.

2. REVISÃO LITERÁRIA

2.1 Circuito

Este estudo utiliza, como base, o modelo monodiodo do circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, apresentado por Villalva et al. (2009), para analisar os fenômenos elétricos internos durante a geração que ocorre na célula.

As resistências evidenciadas através da Figura 1, são de fundamental importância para a avaliação da potência de saída do módulo fotovoltaico. A resistência série, R_s, representa a queda de tensão interna no módulo e afeta de maneira inversamente proporcional a tensão em sua saída, V_D.

A resistência em paralelo, R_p, altera o valor da corrente em sua saída, I_{pv}, de forma proporcional, por apresentar um caminho alternativo (I_{RP}) ao terminais, como ocorre com as correntes parasitas.

Desta forma, é clara a relação entre as resistências e a potência fornecia pelo módulo, sendo explicitada com maior profundidade por Das et al. (2022).

O diodo representa as características semicondutoras da junção p-n do material que compõe a célula fotovoltaica. Com o aumento da temperatura de operação da célula causa o aumento da corrente de saturação reversa do diodo, além de afetar a energia de banda proibida do átomo do semicondutor, que, por sua vez, também modifica o valor de I_D, que flui pelo diodo no modelo, Dhass et al. (2020).

Quanto ao fator de idealidade do diodo, A, este não apresenta variações significativas, em função da temperatura, ao ponto de ser considerado nos cálculos, segundo Ruschel et al. (2021). O valor para os modelos de células de silício mais comuns, como monocristalino e policristalino, são de $1,2$ e $1,3$, respectivamente, conforme Tan et al. (2013).

A corrente fotogerada I_{PH}, perante análise do circuito equivalente, evidentemente se relaciona com a corrente de saída, I_{pv}, o que permite o cálculo daquela em função desta, como expresso em (1).

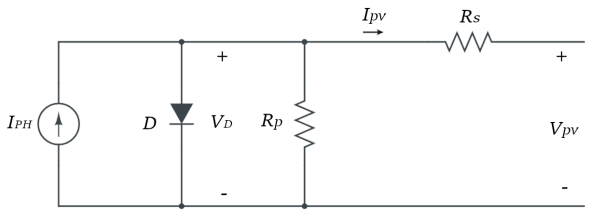

Figura 1. Modelo de circuito monodiodo equivalente de uma célula fotovoltaica.

2.2 Parâmetros

A condição padrão de teste (STC) corresponde ao processo utilizado pelaa indústria para determinação das grandezas no contexto da energia fotovoltaica. Estas condições dizem respeito a uma situação com ambiente equivalente a $1000W/m^2$ de irradiância, temperatura de operação igual a $25°C$ e um coeficiente de massa de ar resultante no valor de $1,5$.

3. METODOLOGIA

3.1 Definições

Para a devida abordagem, primeiramente se faz necessária a determinação dos resistores, R_s e R_p; o fator de idealidade do diodo, A; a corrente fotogerada I_{PH}^{STC}; a corrente de saturação reversa, em STC, I_S^{STC}; e a corrente no ramo do resistor em paralelo, I_{RP}.

Para tal definição de valores, utiliza-se o método iterativo proposto e descrito por Coelho et al. (2022).

Tabela 1. Definição das grandezas.

Descrição	Símbolo	valor
Fator de idealidade	A	$1,306$
Corrente fotogerada em STC	I_{PH}^{STC}	$0,610004A$
Corrente de saturação rever em STC	I_S^{STC}	$9,963nA$
Resistência série	R_s	$0,0043\Omega$
Resistência paralela	R_p	$723,4\Omega$

Os dados do módulo utilizado no estudo, tensão de circuito aberto, V_{oc}; corrente de curto-circuito, I_{sc}; e tensão e corrente de máxima potência, V_{mp} e I_{mp}, estão de acordo com os fornecidos pelo fabricante, para o respectivo modelo *RSM010P*, e estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Dados do módulo.

Dados em STC	-
Potência máxima	$10,W$
V_{oc}	$21.6,V$
I_{sc}	$0.61,A$
V_{mp}	$18.2,V$
I_{mp}	$0.55,A$

3.2 Equações

A analíse do circuito da figura 1 permite expressar a equação (1) referente à corrente fotogerada

$$I_{PH} = I_{PV} + I_D + I_{Rp}. \tag{1}$$

A corrente de saturação reversa do diodo é expressa pela equaçao (2)

$$I_S = I_S^{STC}(\frac{T}{T^{STC}})^3 \cdot e^{\frac{qE_G}{AK}(\frac{1}{T^{STC}} - \frac{1}{T})}. \quad (2)$$

Em que I_S^{STC} condiz com a corrente de saturação reversa nas condições de STC, o que se aplica a T para a temperatura; q representa a carga elementar do eletron ($-1.602 \cdot 10^{-19}$ coulombs); K a constante de Boltzmann $k = 1.380649 \cdot 10^{-23}\, J/K$; enquanto A (adimensional) representa o fator de idealidade do diodo, uma característica construtiva, assim como E_G que está para a energia de banda proibida do semicondutor.

A equaçao (3) expressa I_D, a corrente através do diodo, na forma:

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_D}{AKT}} - 1). \quad (3)$$

A corrente no ramo paralelo, I_{Rp}, por análise de circuito é obtida por:

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{R_S I_{PV} + V_{PV}}{R_p}. \quad (4)$$

Através dos resultados obtidos em 3 e 4 para as correntes de diodo e ramo paralelo, respectivamente, aliados aos valores de I_{PV} medidos por sensor, permite-se estimar, ao se concluir seu desenvolvimento na forma (5), a irradiância:

$$G = \frac{I_{PH}}{I_{PH}^{STC}} \cdot G^{STC} \cdot \frac{1}{1 + \alpha(T - T^{STC})}, \quad (5)$$

em que α representa o coeficiente térmico de variação da corrente de curto-circuito do módulo, o qual é fornecido pelo fabricante.

Ao final, o desenvolvimento do processo matemático para se obter (5), desde (1), encontra-se em maior nível de detalhes na descrição feita por Coelho et al. (2022).

Consequente à definição dos parâmetros internos e desenvolvimento das equações, o conjunto foi inserido em um código computacional para operação em processador *Arduino*, ao qual foram conectados os sensores de corrente, tensão e temperatura, este sendo acoplado na parte traseira do módulo, para monitoramento das condições do módulo de referência.

A Figura 2 ilustra a montagem do circuito do processador *Arduino* com os devidos sensores e o módulo fotovoltaico de referência.

3.3 Sensores

O sensor de corrente utilizado é do modelo *ACS712*, enquanto o de tensão se faz presente pelo *DIYmall Dc0-25v*; ambos foram calibrados em referência ao multímetro digital *Fluke 17B+*, cuja precisão é da ordem de $0,1\%$, até a faixa de $1,35A$ e $25V$, respectivamente.

Quanto ao termômetro, foi utilizado o modelo *DS18B20* com precisão de $0,5\%°C$. Este foi calibrado em referência ao modelo digital, *Instrutherm TH-1600*, cuja precisão

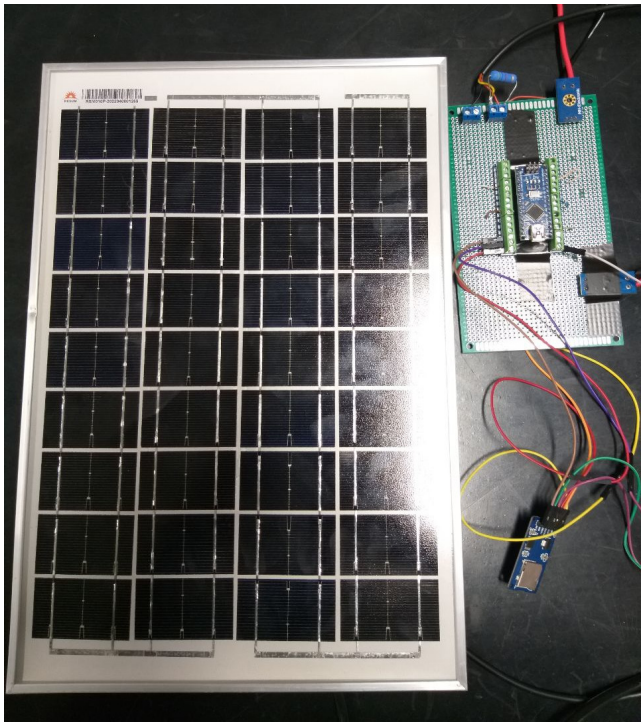

Figura 2. Circuito eletrônico montado com módulo de referência.

consta o valor de $\pm 1°C$, e ao qual foram obtidas medidas de $0,2°C$ de diferença entre ambos.

3.4 Testes

Os testes foram realizados com variadas faixas de irradiância durante três dias na estação do verão, durante o mês de janeiro, com condições atmosféricas variando desde o sol pleno a até mesmo o tempo chuvoso.

Segundo a norma regulamentadora brasileira número 16274, ABNT NBR (2014), o padrão mínimo de $300W/m^2$ é o regulamentado para ensaios que visam a medição da forma de *curva IV*, referênte à corrente e tensão do módulo.

Embora foste testado em uma vasta abrangência de irradiância, a validação dos valores toma como base o recorte a partir do valor de $285W/m^2$, que leva em conta a incerteza de $\pm 5\%$ do recomendado pela referida norma.

O nível de incerteza utilizado basea-se nas especificações fornecidas pelo fabricante *Instrutherm*, por meio do manual do aparelho, acerca do equipamento tido como referência, o *sensor de energia solar MES-100* que pode ser visualizado durante um dos ensaios através da Figura 3.

O limite máximo de irradiância considerado nos cálculos de incerteza do teste, em concordância com o padrão STC de $1000W/m^2$, passa a ser de $1050W/m^2$ por considerar a incerteza do instrumento de referência.

3.5 Ajuste Iniciais

As medidas obtidas pelos sensores (de corrente, temperatura e tensão) são submetidas ao processo matemático iniciado em (1) com seu resultante em (5). No entanto,

Figura 3. Sensor MES-100 junto ao módulo de referência.

algumas etapas são necessárias para tratar os valores obtidos.

Para se obter valores mais precisos, o seguinte procedimento foi adotado para o tratamento inicial das informações geradas, como, inicialmente, a definição do erro de *Offset* conforme método orientado pelo guia mundial de instrumentos metrológicos, Organization (2008), para aplicação em instrumentos profissionais.

Diante da evidente relação de proporção direta entre a corrente fotogerada e a irradiância incidente no módulo, como explicitado em (5), então, é válida a realização de um ajuste linear na curva das estimativas obtidas a fim de refiná-las.

Para o modelo em estudo, o ajuste pelo método de regressão linear gerou a equação 6, assim como os coeficientes presentes nesta, em:

$$y = 0,962 \cdot G + 8,16, \tag{6}$$

sendo G o valor bruto calculado da irradiância, resultante em (5), e y a estimativa final ajustada para o intervalo de $285W/m^2$ a $1050W/m^2$.

Equação (6) possui coeficiente de determinação linear $R^2 = 0,998$, cujo valor unitário é resultante de um ajuste perfeito da curva gerada à amostra, conforme Canale and Chapra (2014).

3.6 Incerteza

Para validação da incerteza das medidas, é considerada a incerteza do *Tipo B*, seguindo as diretrizes do guia de expressão para incertezas de medição - *GUM*, conforme Jcgm et al. (2008), assim como suas orientações sobre a expressão da incerteza combinada no formato do desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}. \tag{7}$$

Equação (7) tem em sua composição a média das irradiâncias calculadas, $\bar{y}$; os valores individualmente calculados em (6), y_i; e a quantidade amostral, N.

Este modelo de incerteza, *Tipo B*, tem como um de seus fundamentos o conhecimento dos instrumentos utilizados para a validação dos dados, que, neste caso, consiste nos valores de incerteza do *MES-100*.

4. RESULTADOS

Durante a estação do verão, foram realizados testes na localidade da cidade de Montes Claros, no estado de Minas Gerais, nos quais foram obtidas várias estimativas em condições atmosféricas diversas como: céu limpo, nublado e até tempo chuvoso - variando desde o período da manhã até ao final da tarde.

Os fatores supracitados proporcionaram a possibilidade de se obter um vasto escopo de amostras nas diversas condições atmosféricas. No entanto, pela disposição física da montagem dos painéis, os testes foram iniciados às 10 horas e 45 minutos, horário em que foi possível se obter a incidência direta da radiação solar sobre os módulos, assim permanecendo até o horário das 17 horas.

Conforme o disposto, os níveis de irradiância obtidos e registrados no estudo chegaram a ultrapassar a marca de $1200W/m^2$ em horários de pico e em condição de sol pleno, a Figura 3 ilustra uma medição com valor próximo ao máximo observado.

4.1 Percentual das Incertezas

Tabela 3. Estimarivas e incertezas obtidas.

Referencial W/m^2	Estimada W/m^2	Incerteza (%)
285	298,66	-4,79%
312	304,66	2,35%
374	375,19	-0,32%
440	439,55	0,10%
515	515,06	-0,01%
620	659,10	-6,31%
620	643,82	-3,84%
696	694,80	0,17%
760	773,90	-1,83%
806	805,75	0,03%
920	933,53	-1,47%
985	994,25	-0,94%
1020	1006,56	1,32%
1050	1047,14	0,27%

A Tabela 3 apresenta um recorte com alguns valores obtidos nos testes dentro do intervalo entre $285W/m^2$ e $1050W/m^2$.

Neste grupo pode-se observar a estimativas muito próximas, com incerteza de $0,01\%$, e outras como a referente a $620W/m^2$, no valor de $659W/m^2$, cuja marca de 6% representa a maior incerteza obtida nos ensaios.

Porém, é valido notar que há outra estimativa, também referente a $620W/m^2$, com menor diferença percentual.

Consoante à observação, o limite da incerteza de $\pm 5\%$, do sensor *MES-100* para $620W/m^2$ consiste em $651W/m^2$ que, quando relacionado ao registro de $659W/m^2$, equivale a a uma diferença de $1,24\%$.

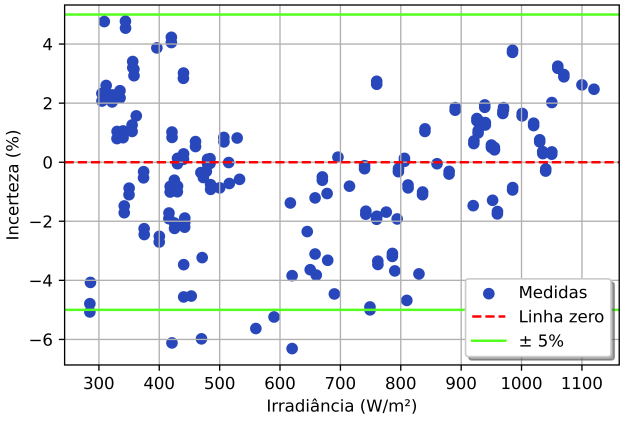

Figura 4. Sensor *MES-100* junto ao módulo de referência.

Na Figura 4, o conjunto com 185 unidades registradas durante os testes estão presentes na forma de um gráfico de dispersão. Nesta estrutura, nota-se que 96,8% das estimativas estão contidas no intervalo de ±5% do valor de referência, isto é, dentro das características expressas por seu fabricante, ou 179 amostras; enquanto 6, ou $3,2\%$, estão fora deste intervalo.

Para melhor compreensão dos resultados calculados, veja a Tabela 4.

Tabela 4. Concentração percentual das incertezas obtidas.

Descrição	Percentual do total das estimativas
Dentro de ± 5%	96,8%
Dentro de ± 2%	63,3%
Dentro de ± 1%	36,2%
Acima de ± 5%	3,2%

A diferença percentual, dentro do recorte amostral apresentado, varia entre os valores de $0,01\%$ a $6,31\%$ superior à referência e $4,77\%$ inferior a esta. Caso considerado o módulo dos percentuais de incerteza, a média se encontra em $1,86\%$ de diferença absoluta, o que se compara a intrumentos profissionai, de acordo com Dunn et al. (2012). A Tabela 5 sumariza esta análise.

Tabela 5. Diferença percentual.

Descrição	Percentual ao valor referencial
Máximo positivo	4,77%
Máximo negativo	-6,31%
Mínimo geral	-0,01%
Média módulo	1,86%

Evidencia-se a margem da incerteza percentual média que está de acordo com as demais incertezas tratadas, as quais estão sucetíveis a interferência de outras grandezas, como a temperatura de operação da célula e a estações do ano, segundo a conclusão de Azouzoute et al. (2019).

A temperatura na área de incidência durante a operação do módulo pode variar, assim como a região sombreada oposta à radiação, o que pode contribuir para o aumento da incerteza da irradiância calculada, de acordo com Carrasco et al. (2017).

4.2 Desvio Padrão

A Tabela 6 exibe os resultados obtidos por meio do método expresso em (7) sobre o conjunto amostral presente na Figura 4. O valor médio de $2,77W/m^2$, aliado ao mínimo de $0,389W/m^2$, demonstra uma baixa variação, no geral. Por outro lado, houve a ocorrência de níveis superiores neste quesito, como o máximo de $23,1W/m^2$.

Nota-se que, durante os experimentos, o conjunto apresentou um desempenho defasado em relação ao *MES-100* no quesito de resposta à variações bruscas de irradiância. Esta diferença oriunda do espectro temporal dos fenômenos internos do módulo, como características dos materiais, está de acordo com os estudos de Hishikawa et al. (2016).

Enquanto este é instantaneamente responsivo, aquele demanda um tempo, notavelmente, maior (da ordem de poucos segundos) para apresentar os resultados causados por variações abruptadas de irradiância, como a disperção repentina de radiação por meio de uma nuvem ou seu bloqueio por um corpo estranho.

Os fenômenos exemplificados podem ser os causadores de distorções nas amostras registras em campo. No entanto, tais fatos são de ocorrência natural no ambiente deste tipo de geração.

4.3 Curvas

Por fim, foi realizado o levantamento de um período de 6 horas, aproximadamente, com alta amplitude de irradiância.

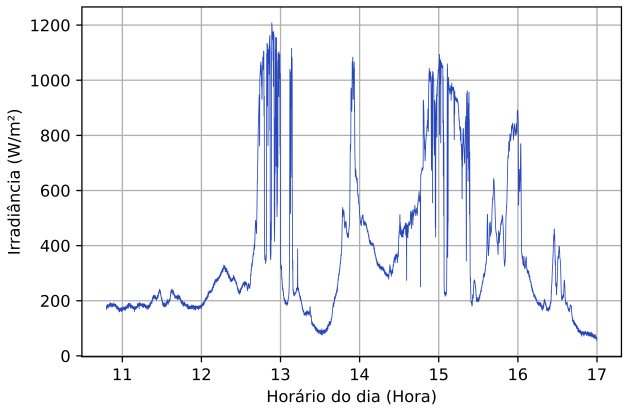

Figura 5. Curva de irradiância durante parte do dia.

Através da Figura 5, percebe-se o alto grau de variação da curva em períodos curtos de tempo, o que pode ser entendido como bloqueio na radiação direta, como nuvens.

Nesta amostra, os níveis de irradiância chegaram a ultrapassar $1000W/m^2$, enquanto a média do período se manteve no valor de $374,72W/m^2$.

Tabela 6. Desvio padrão das estimativas.

Desvio	W/m^2
Mínimo	0,389
Máximo	23,1
Média	2,77

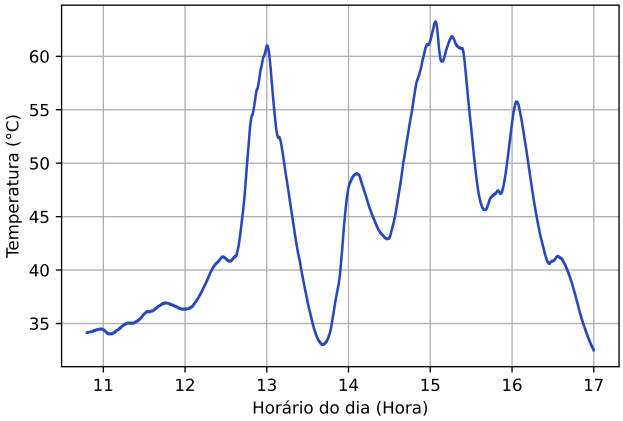

Figura 6. Curva de temperatura durante parte do dia.

Em paralelo, a Figura 6 permite a análise da temperatura, monitorada em sincronia com os dados da Figura 5, que corresponde a uma grandeza influente na irradiânica, como constatado em (5). Veja a Tabela 7 para detalhes.

Tabela 7. Temperaturas de operação do módulo.

Temperatura	°C
Mínima	32,5
Máxima	63,3
Média	44,5

Ambas as curvas apresentam tendência de comportamento que podem se assemelhar entre si. A elevação da irradiância coincide com o aumento de temperatura do módulo, assim como uma menor incidência de radiação com seu resfriamento.

Nota-se, em contraste, a variação bem menos acentuada da temperatura em comparação à curva de irradiância, mesmo estando correlacionadas.

5. CONCLUSÃO

A energia solar fotovoltaica é um campo da geração elétrica com possibilidades abertas para pesquisa e investimento. Para auxiliar nesta abordagem, o monitoramento das grandezas que influenciam esta área pode ser de grande interesse dos envolvidos.

O equipamento desenvolvido e apresentado neste estudo, eleva-se ao posto de opções destiandas a este fim ao possibilitar estimativas de irradiância próximas a de um equipamento profissional, permitindo o armazenamento de dados para uma análise minuciosa e com o uso de métodos analíticos.

Em suma, a base teórica compilada e aplicada provou-se capaz de obter resultados satisfatórios quanto ao grau de exatidão e precisão das estimativas.

REFERÊNCIAS

(2014). *NBR 16274*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro.

Azouzoute, A., Merrouni, A.A., Gennioui, A., et al. (2019). Accuracy measurement of pyranometer vs reference cell for pv resource assessment. *Energy Procedia*, 157, 1202–1209.

Canale, R.P. and Chapra, S.C. (2014). *Numerical methods for engineers*. Mcgraw-hill Education-Europe.

Carrasco, M., Laudani, A., Lozito, G.M., Mancilla-David, F., Riganti Fulginei, F., and Salvini, A. (2017). Low-cost solar irradiance sensing for pv systems. *Energies*, 10(7), 998.

Coelho, R.F., Schmitz, L., and Martins, D.C. (2022). *Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Conversão e Aplicações*. Roberto Francisco Coelho, Lenon Schmitz.

Das, A., Datta Peu, S., Hoque, M., Diganta, A., and Dev, D. (2022). Analysis of the influences of temperature, solar irradiation, reverse saturation current, series resistance and shunt resistance on solar cell.

Dhass, A., Prakash, Y., and Ramya, K. (2020). Effect of temperature on internal parameters of solar cell. *Materials Today: Proceedings*, 33, 732–735.

Dunn, L., Gostein, M., and Emery, K. (2012). Comparison of pyranometers vs. pv reference cells for evaluation of pv array performance. In *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 002899–002904. IEEE.

Hishikawa, Y., Doi, T., Higa, M., Yamagoe, K., and Ohshima, H. (2016). Precise outdoor pv module performance characterization under unstable irradiance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(5), 1221–1227.

Jcgm, J. et al. (2008). Evaluation of measurement data—guide to the expression of uncertainty in measurement. *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, 50, 134.

Martins, F.R., Pereira, E.B., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L.d., Rüther, R., Abreu, S.d.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., and Souza, J.G.d. (2017). Atlas brasileiro de energia solar 2.

Organization, W.M. (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Number v. 7 in OMM (Collection). Secretariat of the World Meteorological Organization.

Program, E.S.M.A. (2020). *Global photovoltaic power potential by country*. World Bank.

Rabaia, M.K.H., Abdelkareem, M.A., Sayed, E.T., Elsaid, K., Chae, K.J., Wilberforce, T., and Olabi, A. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989.

Ruschel, C.S., Gasparin, F.P., and Krenzinger, A. (2021). Experimental analysis of the single diode model parameters dependence on irradiance and temperature. *Solar Energy*, 217, 134–144.

Sens, L., Neuling, U., and Kaltschmitt, M. (2022). Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines–development by 2050. *Renewable Energy*, 185, 525–537.

Tan, R.H., Tai, P.L., and Mok, V. (2013). Solar irradiance estimation based on photovoltaic module short circuit current measurement. In *2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*, 1–4. IEEE.

Villalva, M.G., Gazoli, J.R., and Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, 24(5), 1198–1208.