

MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL EM PLANO INCLINADO UTILIZANDO SISTEMA EMBARCADO DE BAIXO CUSTO

Rodrigo Andrade da Silveira – rodrigo.mackgiver@gmail.com

Samira Fontes Domingos

Lucas Lourenço Reis Resende

Wallace do Couto Boaventura

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais.

Luís Guilherme Monteiro de Oliveira

Departamento de Engenharia Elétrica - IPUC - PUC Minas.

José Rafael Franco

Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

1.3. Instrumentação vinculada a medições meteorológicas

Resumo. Este trabalho realizou a implementação de um sistema embarcado de baixo custo para a medição da irradiância solar global e comparação com um piranômetro. Foram descritos o processo de desenvolvimento e os resultados obtidos para um medidor de radiação solar utilizando os componentes: um módulo fotovoltaico de 20Wp, sensores de tensão e corrente, módulo GPS para sincronização da data e hora das medições e um Shield de armazenamento de dados. Com os dados coletados foram feitas análises de incerteza de medição tanto do sistema embarcado quanto do piranômetro de referência modelo CM3. Os resultados preliminares obtidos, desconsiderando-se alguns fatores de interferência não analisados, mostraram que o sistema é bem satisfatório, contudo, é necessário a realização de outros ensaios e coleta de dados de vários dias em diferentes condições de céu de forma a garantir que as medidas realizadas pelo sistema proposto tenham confiabilidade sob diferentes coberturas de céu. Os indicativos estatísticos utilizados no estudo foram o RMSE, nRMSE, MBE e MAE. Para avaliação do módulo em diferentes coberturas de céu a montagem experimental alcançou os seguintes resultados para dia de céu aberto: RMSE de 70,35, nRMSE de 0,09, MAE de 67,18 e MBE de -67,16. Para dia de céu nublado: RMSE de 92,90, nRMSE de 0,16, MAE de 59,10 e MBE de -26,75. Para dia de céu parcialmente nublado: RMSE de 96,67, nRMSE de 0,16, MAE de 59,10 e MBE de -26,75. As métricas RMSE e nRMSE apontaram que o sistema se comporta melhor para dias ensolarados, porém as métricas MAE e MBE tiveram melhor comportamento para dias nublados, comprovando um bom comportamento preliminar do sistema, já que a realização de boas medidas para dias nublados é mais complexa. Em sua versão final, o sistema produzirá curvas diárias de alta resolução temporal com localização e marca temporal rastreadas por GPS.

Palavras-chave: Energia Solar, Medição de Irradiação Solar, Sistema Embarcado de Baixo Custo

1. INTRODUÇÃO

Conhecer e realizar estudos e previsões da radiação solar que chega à superfície da Terra, tem se tornado cada vez mais importante no âmbito da conversão da radiação solar em energia elétrica. Tais estudos tem possibilitado a difusão da instalação de UFVs, usinas fotovoltaicas. As usinas da modalidade GC, geração centralizada, por exemplo, necessitam de campanhas de medição da radiação solar pelo período mínimo de 1 ano para que sejam outorgados os projetos junto a Aneel. Para suprir essa necessidade, se faz necessário realizar medições da irradiância, de modo a formar bases de dados consistentes que auxiliam no aproveitamento da energia fotovoltaica, tornando-a mais previsível para as companhias e investidores de sistemas de geração fotovoltaica, principalmente para as empresas que atuam nos mercados de energia.

Ainda no campo dos projetos de UFVs, a radiação tem especial atenção em relação a avaliação da eficiência dos módulos fotovoltaicos utilizados para a conversão de energia. Além disso, quando se registra um considerado número de dados de irradiância por um período, é factível calcular a quantidade de energia recebida em uma determinada área.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias de sistemas de hardware e software tem possibilitado uma gama de aplicações instrumentais em geral. Dentre eles, os chamados livres, “Open Source”, que inclusive é a aplicação fundamental deste trabalho. Aqui buscar-se-á o desenvolvimento de um dispositivo de aquisição de dados de baixo custo para medição da radiação solar usando-se um módulo fotovoltaico de medidas reduzidas como sensor de radiação.

O intuito com este desenvolvimento, é possibilitar o uso de módulos fotovoltaicos como sensores de radiação ao invés de piranômetros, que são os instrumentos padrão. Com isso, será possível a realização do monitoramento de produção da energia anual, o que possibilitaria a redução de custos.

Como objetivo precípua deste trabalho, tem-se a validação das medidas de radiação solar realizadas utilizando-se o módulo fotovoltaico bem como a correlação das medidas frente a utilização de uma estação meteorológica e piranômetro padrão. Será aplicada metodologia em que as grandezas elétricas do módulo fotovoltaico serão usadas para conversão em radiação solar.

A validação dos resultados deste trabalho, será utilizada como parte instrumental do desenvolvimento de uma Tese de Doutorado que visa a previsão da radiação solar e que necessita de dados com características peculiares que não são disponíveis no cenário atual. Os dados de medição a serem aplicados nesta Tese, devem possuir alta resolução temporal com intervalos de 1 segundo. O sistema de aquisição de dados aqui desenvolvido vai possibilitar gerar os dados necessários com tais características. Contudo, neste experimento a resolução temporal foi de 1 minuto entre medidas.

Segundo o (ABES, 2017), existem diversos instrumentos capazes de realizar a medição da radiação solar, como os piranômetros a termopilha, piranômetros de fotodiodo e pirheliômetros, que são comercializados por diversas empresas e oferecem uma solução satisfatória para esse fim. Os que se baseiam em termopilha, são constituídos de um conjunto de termopares, realizam a conversão da energia térmica em energia elétrica através de um “corpo negro” que, a partir do calor, gera uma diferença de potencial elétrico, possibilitando mensurar a radiação solar. Já os de fotodiodo, através do efeito fotovoltaico, convertem a radiação solar incidente em corrente elétrica sob determinadas condições e, esta corrente elétrica é proporcional à irradiância incidente. Os pirheliômetros, por sua vez utilizam um princípio similar ao piranômetro a termopilha, porém depende do alinhamento de seu colimador com o Sol, o que faz com que apenas a componente normal da radiação incida sobre ele.

Tais equipamentos, apesar de suprirem a necessidade por instrumentos de medida da radiação solar, possuem um custo que pode ultrapassar a faixa de dezenas de milhares de reais (Anagha, 2018), dificultando seu uso em projetos de pesquisa e comerciais, geração distribuída e centralizada (Shibuya, 2022). Nesse contexto, diversos projetos de pesquisa desenvolvidos buscaram propor soluções de baixo custo que possam ser utilizadas em diversas aplicações como em (Benítez, 2021), (Shibuya, 2022) e (Paula, 2020).

Sendo assim, o presente estudo desenvolveu um sistema embarcado a partir de (Andrade *et al.*, 2020) capaz de realizar medições da irradiância solar global, de modo a propor uma alternativa de baixo custo e desempenho satisfatório para ser utilizada em projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico e comerciais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização e Clima

O estudo foi elaborado utilizando as medidas de irradiância solar global obtidas pelo Laboratório de Agrometeorologia (22°54'S de latitude, 48°27'O de longitude e 786m de altitude) do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP de Botucatu, São Paulo - Brasil. A cidade de Botucatu é um município de aproximadamente 145 mil habitantes em uma área territorial de 1.482,642 km², com bioma Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2023). O município está localizado próximo a duas grandes represas (Barra Bonita e Jurumirim) e está distante aproximadamente 221 km do oceano atlântico (Rossi *et al.*, 2018). O referido laboratório atua no monitoramento das componentes solares há mais de 20 anos. Nele são realizados diversos experimentos.

2.2 Componentes do sistema de medição e monitoramento

O dispositivo de aquisição de dados, DAQ, apresentado no estudo utiliza a plataforma Arduino. A plataforma Arduino, trata-se de sistema embarcado de prototipagem eletrônica de código aberto que permite aos usuários criarem projetos eletrônicos interativos. No trabalho foi utilizado o microcontrolador Arduino Mega 2560.

Com a finalidade de sincronização das medições de irradiância solar global ao longo dos dias, foi utilizado o módulo GPS Mini NEO-7N. Através dele foi possível receber informações de data e hora sincronizados por satélite para possibilitar o microcontrolador o controle do tempo entre cada coleta de medida, bem como indicando o horário de início e final das medições ao decorrer do dia.

Para o armazenamento e a coleta dos dados, foi utilizado um Módulo Micro SD Card compatível com Arduino. O módulo, realiza as gravações de arquivos através de interface SPI com interface serial com o Arduino e permitindo a gravação de dados em um cartão Micro SD. Com isso, é possível fazer a coleta dos dados para intervalos de tempo determinados.

Para a medição de corrente elétrica do módulo fotovoltaico, foi utilizado o sensor ACS712. Conforme documentação do sensor, este possui sensibilidade da ordem 62,5 mV para cada 1 A percorrido pelo sensor. O módulo sensor de corrente possui um amplificador interno de precisão que mede a tensão através de um resistor de detecção de 0,1Ω e precisão de 1%. Sendo a diferença máxima de entrada do amplificador de ±320 mV, isso permite inferir que este pode medir até ±3,2 A. Uma vez que o DAQ possui um conversor ADC interno de 12 bits, a resolução do mesmo é de 0,78 mA. Em relação a medição de tensão, foi utilizado o sensor B25, que segundo datasheet, pode fazer leitura com range de 0,02445 a 25 V, suficientes para realizar a leitura de tensão do módulo fotovoltaico. Uma vez que o módulo fotovoltaico, cujas tensões e correntes de saída possuem range respectivamente de: 0 a 17,9 V e 0 a 1,32 A, os sensores são perfeitamente aplicáveis.

Ainda compõe a instrumentação deste trabalho, um controlador de carga que fará a interface entre o módulo fotovoltaico e sistema de medição e monitoramento que será alimentado por uma bateria que será recarregada pelo próprio módulo fotovoltaico usado como sensor de radiação solar. Além deste, foi utilizada uma carga (lâmpada) para drenar a energia da bateria, possibilitando a fluidez da corrente elétrica do módulo possibilitando a alimentação da bateria.

2.3 Arquitetura de medição, sincronização, medição e coleta de dados

A estrutura do sistema de monitoramento e medição é apresentada na Fig. 1, identificando as conexões dos sensores ao DAQ e na Fig. 2, é possível verificar a estrutura de conexão geral dos componentes com o controlador de carga, módulo fotovoltaico, bateria e uma lâmpada que serve de carga para dreno de energia da bateria para que possa ser recarregada pelo próprio módulo fotovoltaico usado como sensor da radiação.

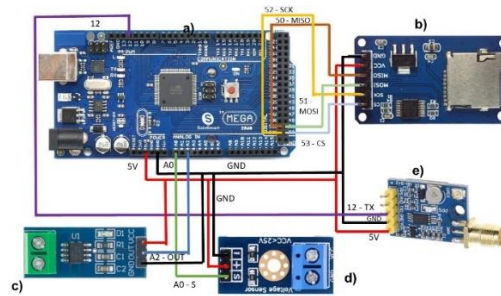


Figura 1 - Esquema elétrico dos componentes para a coleta de dados.

(a) Arduino, (b) SD Card, (c) sensor de corrente, (d) sensor de tensão e (e) módulo GPS

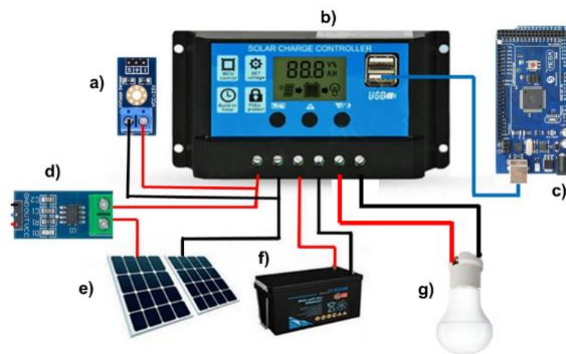


Figura 2 - Esquema de geral das conexões dos componentes. (a) sensor de tensão, (b) controlador de carga, (c) Arduino, (d) sensor de corrente, (e) Módulo fotovoltaico, (f) bateria e (g) Carga (lâmpada).

2.4 Montagem do experimento em campo

Para realização do experimento de medida da irradiância solar global, foi utilizado um piranômetro modelo CM3 da *Kipp & Zonen* posicionado próximo ao módulo FV a uma inclinação de 34° , ambos fixos a uma estrutura apontada para o norte verdadeiro, ver Fig. 3. A aquisição e armazenamento dos dados do piranômetro foi realizado por um registrador modelo CR1000 *Campbell Scientific* ©. As leituras foram realizadas a com resolução temporal de 1 minuto entre os dias 01/11/2023 e 15/11/2023. A Fig. 3 ilustra a montagem do piranômetro bem como o módulo fotovoltaico testado.



Figura 3 - Localização dos medidores. (a) Piranômetro CM3 e (b) módulo fotovoltaico.

O sistema embarcado com toda a instrumentação, foi incorporado em um local ao abrigo de sol e chuva e foi conectado ao módulo fotovoltaico, no campus da Unesp, em Botucatu, SP. A Fig. 4a, ilustra o suporte com módulo fotovoltaico. A Fig. 4b mostra a instalação da instrumentação e sensores e a Fig. 4c mostra imagem aproximada de todo o conjunto de equipamentos montados.



Figura 4 - Montagem experimental. Suporte com módulo fotovoltaico, (b) Instalação da instrumentação e sensores, (c) Arranjo de equipamentos montados.

2.5 Modelo matemático para conversão de energia do módulo fotovoltaico em irradiância solar

Os trabalhos de (Neves, 2016) e por (Nobre, 2015) apresentam modelos matemáticos que são aplicáveis a conversão da energia produzida por um módulo fotovoltaico em irradiância. O modelo matemático aplicado para conversão da energia produzida pelo módulo em radiação, é o que determina a eficiência do módulo. Conforme (Neves, 2016), este parâmetro indica o quão eficiente é o processo de conversão da energia solar em energia elétrica, definida como a razão entre a potência máxima produzida pelo módulo e a potência radiante que chega até ele como na Eq. 1. Em (Nobre, 2015) o modelo matemático para monitoramento da irradiância e utilizado e validado, dando subsídio para aplicação neste trabalho conforme Eq. 2.

Em seu trabalho (Carillo *et al.*, 2017) relatam que medições externas ao ar livre de módulos fotovoltaicos, foram amplamente reconhecidas por instituições de pesquisa renomadas como, *Arizona State University Photovoltaic Test Laboratory* (Whitfield e Osterwald, 2001), *European Solar Test Instalation*, *European Commission's Joint Research Center e Florida Solar Energy Center*. Todos esses dedicados a estudos de transferência de curvas I-V obtidas em condições externas para condições de ensaio padrão, (*Standard Test Conditions*, STC).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{A * G} \quad (1)$$

Manipulando-se algebricamente a Eq. 4, é possível chegar-se aos valores de radiação solar incidente no módulo conforme Eq. (2).

$$G = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{A * \eta} \quad (2)$$

Onde:

η = Eficiência do Módulo (11,13%) [%]

P_{MP} = Potência máxima produzida pelo módulo (20W) [W]

P_{IN} = Potência máxima que chega ao módulo [W]

V_{mp} = Tensão Medida no módulo [V]

I_{mp} = Corrente Medida no módulo [A]

A = Área do módulo (0,14m²) [m²]

G = Irradiância [W/m²]

3. Medições e incertezas da radiação solar

A avaliação da incerteza do desempenho do componente ou sistema é baseada em medições e análises sob certas condições fixas, bem como na extrapolação (chamada modelagem) do comportamento do componente ou sistema para outras condições operacionais. Portanto, as incertezas das medições são incluídas em todas as etapas consecutivas de

avaliação ou modelagem (Oliveira, 2017). Por conseguinte, esta seção cobre as incertezas relacionadas aos mensurados mais importantes relacionados aos módulos fotovoltaicos: recurso solar e propriedades do módulo.

3.1 Sensores de irradiância e incertezas relacionadas

Segundo o guia da (WMO, 2021) a incerteza nas quantidades de irradiância medidas e projetadas é um fator do período em consideração. Conforme o guia, este período deve sempre ser indicado juntamente com o valor da incerteza porque as quantidades de irradiância integradas para um ano, mês, dia ou hora específico, terão incertezas diferentes. No caso das quantidades projetadas, os períodos mais curtos são dominados pela variabilidade climática; enquanto para medições, diferentes características do instrumento entram em jogo para diferentes períodos. Por exemplo, ao longo de um ano, a instabilidade dos instrumentos pode ser um fator significativo, ao passo que ao longo de um determinado dia isso seria insignificante. Da mesma forma, ao longo de um dia, os erros de não linearidade do instrumento podem ser anulados, mas ao longo de uma determinada hora é mais provável que conduzam a um viés nas medições. Esta situação é refletida na classificação de piranômetros da WMO, onde as incertezas alcançáveis exigidas para totais horários são de até duas vezes os valores para totais diários.

A incerteza nas medições de irradiância estão em parte relacionadas aos instrumentos e em parte às práticas de medição. As melhores práticas para minimizar esses fatores podem ser conferidas nos trabalhos de (WMO, 2021), (Sengupta, 2015) e (McArthur, 2005).

3.2 Incertezas da eficiência de módulos fotovoltaicos em condição padrão de teste (STC)

Módulo fotovoltaicos são testados sob condições padronizadas, que do inglês receberam o acrônimo STC, *Standard Test Conditions*. Para a estimativa da incerteza, é importante que as questões de estabilidade sejam consideradas. Além da incerteza pura de medição, a potência em STC muitas vezes não é um valor constante, mas dependente da exposição anterior à luz e à temperatura.

A incerteza da potência de um módulo em STC exigida para classificação energética é composta pela incerteza de medição e pela incerteza devida a efeitos iniciais ou outros efeitos de estabilidade.

3.3 Incertezas de medição dos instrumentos de medida

Conforme definição do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012), a incerteza de medição é “o parâmetro, associado ao resultado de uma medição que, caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”.

Para a análise de incerteza dos instrumentos foram adotadas as avaliações de incertezas conforme a seguir:

Incerteza tipo A. Este tipo de avaliação é geralmente assumido como tendo distribuição de probabilidade normal. Quando repetidas leituras (n observações independentes) são tomadas sob as mesmas condições de medição, tanto a média aritmética \bar{x} quanto o desvio-padrão experimental S podem ser calculados. Desta forma, a incerteza-padrão da média $u(\bar{x})$, normalmente chamada de desvio-padrão experimental da média, pode ser estimada por meio da Eq. 3 e Eq. 4.

$$u(\bar{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Incerteza Tipo B. Segundo GUM 2008 (Inmetro, 2012b), a avaliação do Tipo B é um método de avaliação de incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações. As informações podem ser obtidas através de diversas fontes, tais como: dados de certificado de calibração, especificações do fabricante, dados de medições prévias e outras.

Incerteza combinada. Nesta avaliação levamos em consideração os resultados das incertezas Tipo A e Tipo B, ou seja, é aplicada quando se tem o resultado de uma medição e este, é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas. Neste trabalho as grandezas físicas base mensuradas foram a tensão e corrente do módulo fotovoltaico, sendo assim foi preciso analisar a incerteza de cada grandeza mensurada. O resultado desta incerteza será igual a raiz quadrada positiva de uma soma de termos que, constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com

mudanças netas grandezas. Como as grandezas de entrada mensuradas são independentes, a incerteza padrão combinada é estimada conforme a Eq. 5.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (5)$$

Em que: u_c é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderia, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurando Y; f é a função que correlaciona as grandezas de entrada; $u(x_i)$ é a incerteza padrão avaliada podendo ser do tipo A ou B.

4. RESULTADOS

Tabela 1 - Resultado da análise de incerteza de medição dos instrumentos usados para mensurar a irradiância para três dias com condições de céu diferentes.

Dia 05/11/2023 - dia com céu aberto							
Incerteza sensor de tensão		Incerteza sensor corrente		Incerteza padrão módulo		Incerteza padrão piranometro	
Incerteza tipo B	1,32%	Incerteza tipo B	1,98%	Incerteza tipo B	3,00%	Incerteza tipo B	1,00%
Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A	
Média	12,21348	Média	1,120582	Média	719,1429	Média	786,3034
Incerteza das medidas	0,504203	Incerteza das medidas	0,34286	Incerteza das medidas	220,0298	Incerteza das medidas	217,6475
Incerteza Tipo A	0,531021	Incerteza Tipo A	0,048721	Incerteza Tipo A	31,26708	Incerteza Tipo A	34,1871
Incerteza combinada	0,53378	Incerteza combinada	0,052591	Incerteza combinada	31,2671	Incerteza combinada	34,18711
Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A	
Dia 04/11/2023 - dia com céu parcialmente nublado							
Incerteza sensor de tensão		Incerteza sensor corrente		Incerteza padrão módulo		Incerteza padrão piranometro	
Incerteza tipo B	1,32%	Incerteza tipo B	1,98%	Incerteza tipo B	3,00%	Incerteza tipo B	1,00%
Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A	
Média	12,16572	Média	1,144677	Média	713,2136	Média	792,4054
Incerteza das medidas	0,536414	Incerteza das medidas	0,352598	Incerteza das medidas	219,7083	Incerteza das medidas	224,3368
Incerteza Tipo A	0,544613	Incerteza Tipo A	0,051243	Incerteza Tipo A	31,92783	Incerteza Tipo A	35,47294
Incerteza combinada	0,54754	Incerteza combinada	0,547535	Incerteza combinada	31,9278	Incerteza combinada	35,47294
Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A	
Dia 09/11/2023 - dia com céu nublado							
Incerteza sensor de tensão		Incerteza sensor corrente		Incerteza padrão módulo		Incerteza padrão piranometro	
Incerteza tipo B	1,32%	Incerteza tipo B	1,98%	Incerteza tipo B	3,00%	Incerteza tipo B	1,00%
Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A		Incerteza Tipo A	
Média	12,09699	Média	0,909595	Média	566,7529	Média	593,5073
Incerteza das medidas	0,550979	Incerteza das medidas	0,3014	Incerteza das medidas	187,8078	Incerteza das medidas	180,3452
Incerteza Tipo A	0,017207	Incerteza Tipo A	0,044226	Incerteza Tipo A	27,55647	Incerteza Tipo A	26,56904
Incerteza combinada	0,05309	Incerteza combinada	0,053088	Incerteza combinada	27,5565	Incerteza combinada	26,56904
Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A		Prevalece Incerteza Tipo A	

O resultado da análise das incertezas de medição apresentados na Tab. 1, inferem que os valores medidos tendem a seguir a incerteza do TIPO A, isso independente da condição de céu no momento das medidas. uma vez que o resultado da incerteza combinada exprime os mesmos valores. De tal forma, foi possível avaliar que o módulo fotovoltaico sob diferentes condições de céu, indica uma incerteza da ordem de $31,1634 \text{ W/m}^2 \pm 2,95\%$ considerando os três dias de medição para condições de céu distintas. Com os resultados da análise de incerteza, foi ainda calculado um fator de correção a ser aplicado para a radiação medida pelo módulo fotovoltaico. Na Fig. 3a apresenta as medidas em um dia de céu aberto, sem a passagem de nuvens. As medidas do Arduino são menores que as medidas do piranômetro. A Fig. 3b apresenta a comparação em dia de céu parcialmente nublado. Na Fig. 3c são apresentadas as medidas em um dia nublado.

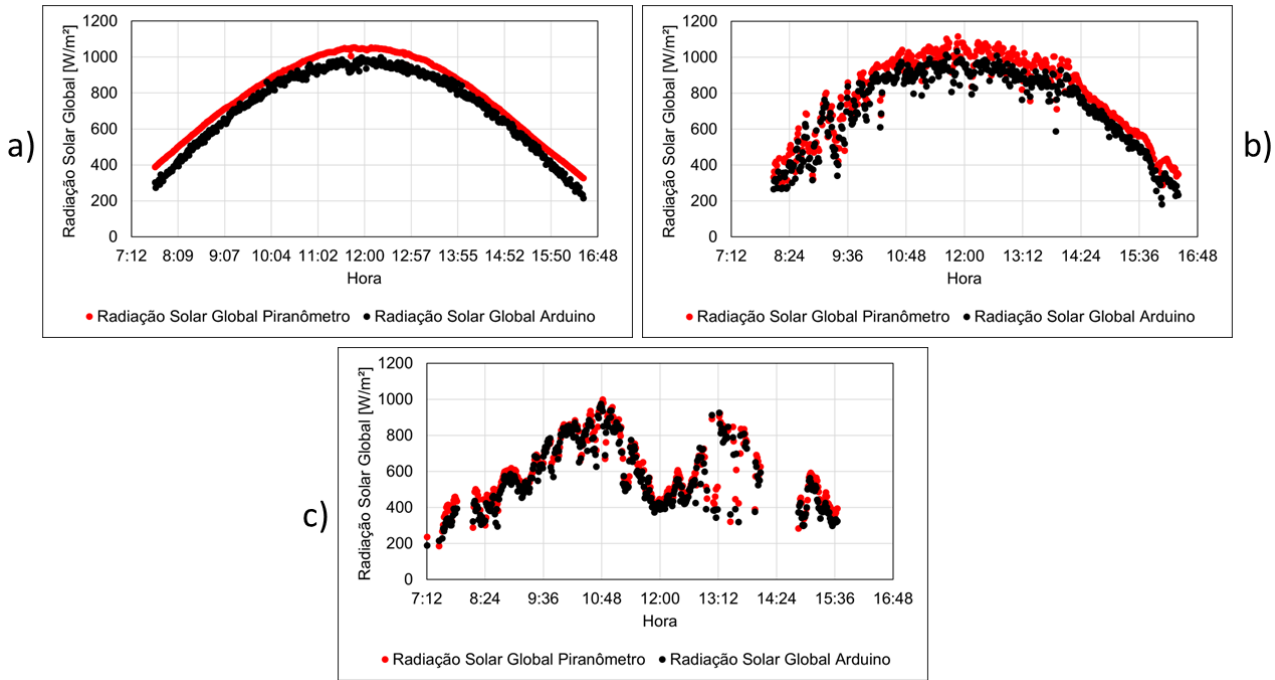


Figura 3 - Comparação de medidas de radiação solar registradas pelo piranômetro e pelo Arduino em diferentes condições de céu. (a) Céu aberto, (b) Céu parcialmente nublado e (c) nublado.

Para dias nublados ou parcialmente nublados são esperadas variações nas medidas feitas tanto pelo piranômetro quanto pelo módulo fotovoltaico. Como já mencionado, outros fatores de interferências não foram avaliados e contribuem para dispersão das medidas do módulo fotovoltaico. Esses, inclusive são itens de melhoria para trabalhos futuros.

Uma análise estatística comparou os dados medidos pelo Arduino com os dados coletados pelo Piranômetro, utilizando de quatro métricas importantes. Os resultados são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Resultado da análise estatística.

Métrica	Condição do céu		
	Ensolarado	Parcialmente nublado	Nublado
RMSE [W/m ²]	70,35	96,67	92,90
nRMSE [W/m ²]	0,09	0,12	0,16
MAE [W/m ²]	67,18	84,74	59,10
MBE	-67,16	-79,19	-26,75

O RMSE tem uma escala de 0 a valores arbitrários, de acordo com (EUMETRAIN, 2020), e é a magnitude média dos erros estimados e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores estimados. Na análise realizada, percebe-se que para dias ensolarados o RMSE tem um valor muito melhor que os demais. Já o nRMSE, que é o RMSE normalizado, também tem seu melhor valor próximo de zero. O nRMSE facilita bastante a análise e mostra que para todas as condições de céu estudadas, o Arduino apresenta uma semelhança relevante e resultados plausíveis. A análise dessa métrica mostra novamente que o sistema tem um melhor comportamento para dias de céu limpo. O MAE tem uma escala de 0 a valores arbitrários, de acordo com (EUMETRAIN, 2020), e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores estimados. Apesar da mínima diferença, a métrica MAE teve um melhor comportamento para dias nublados, o que é um ponto importante a se considerar, já que é muito mais complexo conseguir um bom comportamento do sistema

para dias com grande nebulosidade, perante dias de céu claro. O MBE por ser um valor negativo, mostra que a previsão tem valores subestimados, como é demonstrado nos gráficos da radiação solar. O MBE também teve um melhor resultado para dias nublados, apontando um bom comportamento preliminar do sistema.

Na análise da linha de tendência para os dados medidos para as diferentes condições de céu, na Fig. 4a, percebe-se que a correlação dos dados entre o piranômetro e o Arduino, possui melhor simetria para condições de céu aberto. Na Fig. 4b, a correlação dos dados para um dia parcialmente nublado, mantém ainda uma boa simetria, porém apresentando uma maior dispersão dos dados. A Fig. 4c, que apresenta a correlação entre os dados para um dia nublado, mostra uma dispersão ainda maior entre as medidas feitas por ambos os instrumentos. De forma geral, existe uma dispersão de dados em razão das condições do céu e de outros fatores, como velocidade do vento e temperatura do módulo, aqui não levados em consideração neste trabalho. Para as condições gerais em que o experimento foi realizado, a melhor tendência entre as medições se mostra para condições de céu aberto. Para dias nublados ou parcialmente nublados, esta correlação pode ser melhorada ao se avaliar os fatores de interferência aqui não estudados dando um melhor subsídio para o sistema proposto.

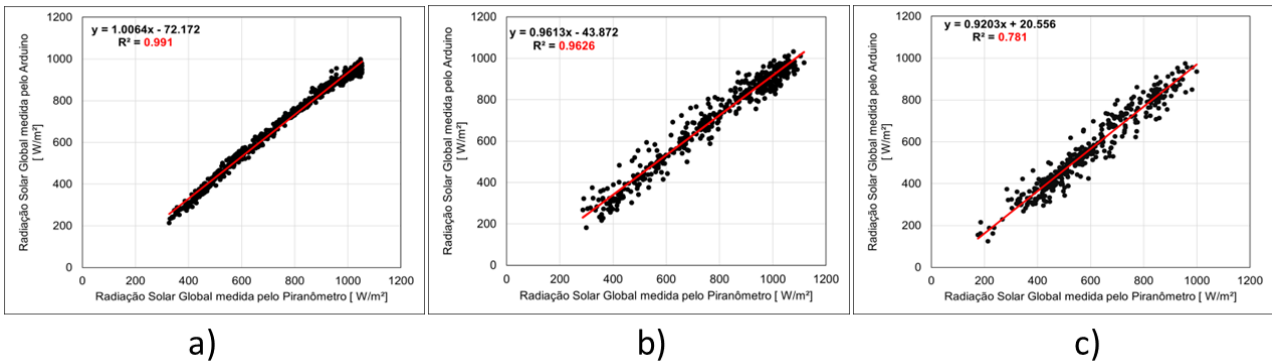


Figura 4 – Assertividade entre as medidas do piranômetro e do Arduino em diferentes condições de céu. (a) Céu aberto, (b) Céu parcialmente nublado e (c) nublado.

Para uma avaliação do comportamento dos dados em relação à simetria e dispersão, plotou-se um gráfico *Boxplot* conforme apresentado na Fig. 5 (Silva, 2022).

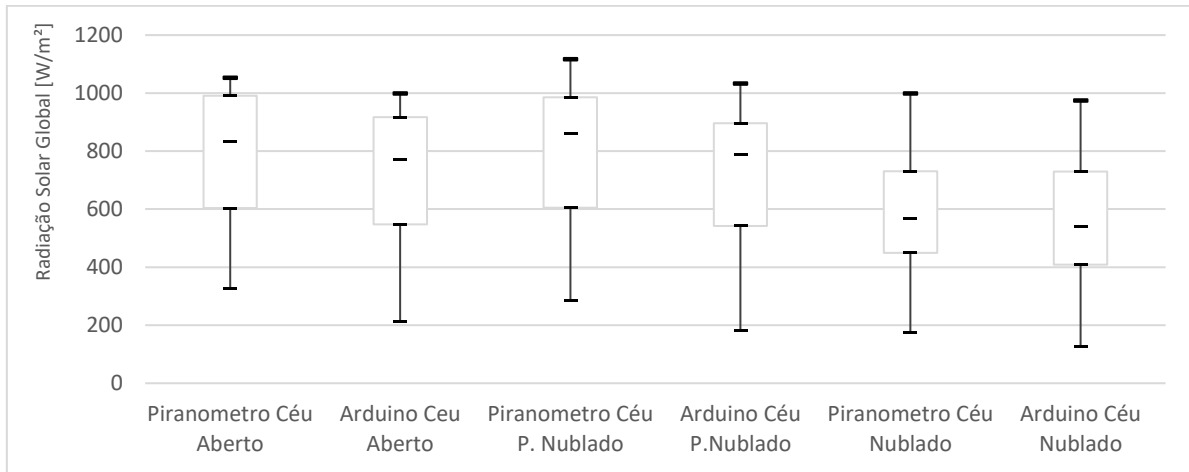


Figura 5 - Gráfico de simetria e dispersão dos dados medidos para diferentes condições de céu.

A análise gráfica do *Boxplot* apresenta as estatísticas usadas na análise entre as medições realizadas pelo sistema embarcado mais módulo fotovoltaico e o piranômetro. Para dias em condições de céu distintas, ensolarado, parcialmente nublado e nublado, o gráfico apresentou valores máximo sem a presença de outliers (discrepâncias) para quaisquer dos instrumentos. A dispersão verificada para os três dias analisados, indicou que nos dias de céu aberto e parcialmente nublados, os valores das medidas estão mais próximos aos valores do (Quartil 3), contudo ainda com margem considerável de proximidade ao Quartil 2 (mediana). Para o dia nublado a dispersão dos valores já fica bem próxima ao Quartil 2. A posição, que é analisada pela mediana, infere sobre a simetria dos dados, e, na análise percebeu-se que os valores medidos são assimétricos negativos para os dias de céu aberto e parcialmente nublados, ou seja, estão mais próximos ao terceiro Quartil para ambos os instrumentos e sistemas. Por fim, o *Boxplot*, permite verificar que a variabilidade entre os dados de ambos os instrumentos possui boa correlação.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o intuito foi demonstrar que é possível realizar medições de irradiância utilizando-se sistemas embarcados como dispositivos de aquisição de dados associados a módulos fotovoltaicos fazendo o papel do sensor de radiação (piranômetro) com um baixo custo.

A metodologia aplicada, antes já validada, pode ser confirmada novamente em face dos resultados obtidos. A confiabilidade dos resultados foi satisfatória, contudo, carece de melhorias com estudos posteriores a serem realizados levando-se em consideração outros fatores de interferência que não foram avaliados neste trabalho. A análise de incerteza de medição, permitiu que fosse verificada a rastreabilidade das medições feita com o sistema embarcado e módulo fotovoltaico em razão dos dados medidos pelo piranômetro. Os resultados aferiram uma boa correlação entre os dados de ambos os equipamentos. Além disso, foi possível chegar-se ao fator de correção das medidas feitas pelo sistema proposto uma vez que foi feita a calibração durante o experimento.

A análise estatística demonstrou através das métricas RMSE e nRMSE que o sistema se comporta melhor para dias de céu limpo, porém as métricas MAE e MBE tiveram melhor comportamento para dias nublados, comprovando que os testes iniciais do sistema indicaram que ele é capaz de funcionar bem mesmo em dias nublados, o que é um desafio.

De forma geral, o sistema proposto, ainda que carecendo de melhorias, indica que pode ser utilizado para fins de medição da radiação solar. Cabe ressaltar, que sua aplicação sempre que possível deve ser aferida por um piranômetro padrão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPGEE – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP de Botucatu, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação e Instituto Politécnico da PUC Minas, ao professor Dr. Alexandre Dal Pai e Professor Dr. Enzo Dal Pai pelo auxílio no experimento, à CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, ao Projeto de P&D CEMIG-ANEEL D0727 – Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV – FASE II pela viabilização e apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Anagha M. J., 2018. A Survey of Solar irradiance Measurement. 2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). Madurai, Tamil Nadu, Índia: IEEE. doi:10.1109/iccic.2018.8782393.
- Andrade. R.; Domingos, S.F.; Luís Guilherme Monteiro Oliveira; Boaventura, W. C., 2020. Proposta de Plataforma para Monitoração Sincronizada de Dados solarimétricos com Alta Resolução Temporal. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. Anais VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar 2020.
- Benítez, J. S., 2021. Sensores de Baixo Custo para Monitoramento Contínuo da Umidade do Solo e Radiação Solar. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Cruz das Almas, Bahia, Brasil.
- Carillo, M. J *et al.*, 2017. Uncertainties on the Outdoor Characterization of PV Modules and the Calibration of Reference Modules. Solar Energy 155 (2017) 880-892. ISSN 0038-092x. doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.028.
- Eumetrain, 2020. Acesso em 13 de 03 de 2020, disponível em Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Squared Error (RMSE): http://www.eumetrain.org/data/4/451/english/msg/ver_cont_var/uos3/uos3_ko1.htm
- GUM. Guia Para Expressão de Incerteza de Medição. Avaliação de Dados de Medição, 2012. Disponível em; https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/gum_final.pdf/@download/file. Acesso em: 24/01/2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/botucatu.html>. Acesso em: 12 nov. 2023.
- McArthur L. J. B., 2005. Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations Manual. Version 2.1. WCRP-121, WMO/TD-No. 1274.
- Neves, G. M., 2016. Influência do Espectro da Radiação Solar em Módulos Fotovoltaicos. INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais. sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.05.20.52-TDI.
- Nobre, A. M., 2015. Short-term Solar Irradiance Forecasting and Photovoltaic Systems Performance in a Tropical Climate in Singapore. Tese Doutorado PPGE-UFSC.
- Oliveira, L.G.M., 2017. Avaliação de Fatores que Influenciam na Estimativa da Geração e Operação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica. Tese de Doutorado PPGEE – UFMG.
- Paula J. F. S., 2020. Confecção e Análise de um Piranômetro Fotovoltaico de baixo custo. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, Ceará, Brasil.

- Pereira E. B, F. R., 2017. ABES. Atlas Brasileiro de Energia Solar (2ª ed.). São José dos Campos, Brasil: Editora Brasil Energia. Acesso em 28 de novembro de 2023, disponível em http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html.
- Rossi, T. J.; Escobedo, J. F.; Santos, C. M.; Rossi, I. R.; Silva, M. B. p.; Dal Pai, E., 2018. Global, Diffuse and Direct Radiation of the Infrared Spectrum in Botucatu/SP/Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Belfast, v. 82, part 1, p. 448-459. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.030>. disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117312753?via%3Dihub>. Acesso em: 21 set. 2023.
- Sengupta, M; *et al.* 2015. Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications. NREL/TP-5D00-63112. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Shibuya, M. K, G. H., 2022. Desenvolvimento de Medidor de Irradiância e Irradiação Solar de Baixo Custo para fins Didáticos. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Silva, T.G., 2022. Análise Estatística do Comportamento da Radiação de onda Curta para Cidade de Natal. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1228>.
- VIM., 2012. Vocabulário Internacional de Metrologia. Conceitos Fundamentais e Termos Associados. Disponível em: https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2021/02/vim_2012.pdf.
- WMO., 2021. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO No. 8. 7th edition. Geneva, Switzerland.

GLOBAL IRRADIANCE MEASUREMENT ON AN INCLINED PLANE USING A LOW-COST EMBEDDED SYSTEM

Abstract. *This work implemented a low-cost embedded system for measuring global solar irradiance. The development process and the results obtained for a solar radiation meter using as a sensor a 20Wp photovoltaic module, voltage and current sensors, a GPS module for synchronizing the measurement time and a data storage Shield were described. With the data collected, measurement uncertainties were analyzed for both the embedded system and the standard reference pyranometer used to calibrate the experiment. The preliminary results obtained, disregarding some unanalyzed interference factors, showed that the system is very satisfactory, however, it is necessary to carry out other tests in different solarimetric conditions in order to guarantee that the measurements carried out by the embedded system and photovoltaic module have reliability in full sun and cloudy days. Four notable metrics (RMSE, nRMSE, MBE and MAE) were used to evaluate the module for different sky conditions. The experimental setup achieved the following results for a clear day: an RMSE of 98.6670.35, nRMSE of 0.140.09, MAE of 78.0467.18 and MBE of -56.6367.16. For a cloudy day: RMSE of 92.90, nRMSE of 0.16, MAE of 59.10 and MBE of -26.75. For a partially cloudy day: RMSE of 96.67, nRMSE of 0.16, MAE of 59.10 and MBE of -26.75. The RMSE and nRMSE metrics showed that the system behaves better for sunny days, however the MAE and MBE metrics had better behavior for cloudy days, proving a good preliminary behavior of the system, since taking good measurements for cloudy days is more complex. In its final version, the system will produce high temporal resolution daily curves with location and timestamp tracked by GPS.*

Keywords: *Solar Energy, Solar Irradiance Measurement, Low-Cost Embedded System*