

SIMIRSOL: Sistema para Simulação de Irradiância Solar

Baron, Felipe Hiroshi¹; Iaione, Fábio¹

¹Faculdade de Computação – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS)
Av. Costa e Silva, s/n – Cidade Universitária – 79070-900 – Campo Grande, MS – Brasil

felipehiroshi13@gmail.com, iaione@facom.ufms.br

Abstract. *The use of photovoltaic cells as an energy source is increasingly present in embedded systems, so the analysis of the functioning of these cells is very relevant for verifying the autonomy of these systems. In this context, the exposure of photovoltaic cells to a known and controlled irradiance is essential to test them. Thus, we developed a low-cost irradiance simulator using a solar radiation sensor and LEDs with closed-loop control. We used a PI controller and performed tests with actual irradiance data. The proposed system, called SIMIRSOL, enables the assessment of the functioning of photovoltaic cells, facilitating their use as an energy source in embedded systems.*

Resumo. *O uso de células fotovoltaicas como fonte de energia está cada vez mais presente nos sistemas embarcados, portanto a análise do funcionamento dessas células é de extrema importância para verificar a autonomia desses sistemas. Nesse âmbito, a exposição das células fotovoltaicas a uma irradiância conhecida e controlada é imprescindível para testá-las. Assim, utilizando-se um sensor de radiação solar e LEDs, em malha fechada, foi desenvolvido um simulador de irradiâncias de baixo custo. Utilizou-se um controlador PI e foram realizados testes com dados reais de irradiância. Com o sistema proposto, chamado de SIMIRSOL, pode-se analisar o funcionamento das células fotovoltaicas, facilitando o seu uso como fonte de energia em sistemas embarcados.*

1. Introdução

O uso de sistemas embarcados (SEs) está cada vez mais presente no cotidiano, desde aparelhos domésticos até dispositivos no ramo agropecuário. Diante disso, percebe-se que quando esses aparelhos são aplicados em larga escala, fica inviável a utilização de pilhas ou baterias descartáveis. Por exemplo, um pequeno sistema embarcado utilizado para monitorar remotamente cada animal em um rebanho bovino não pode utilizar pilhas descartáveis. Em grandes rebanhos, com dezenas ou centenas de milhares de cabeças, o custo financeiro para substituição de pilhas e o estresse gerado nos animais pelo aprisionamento necessário inviabilizam totalmente esse tipo de fonte de energia. Além disso, existe todo o problema ambiental relacionado ao descarte desses dispositivos [Deng 2015], [Oliveira et al. 2015].

Com isso, fontes de energia alternativas, como células fotovoltaicas (CFs), estão sendo cada vez mais utilizadas para resolver esse problema [Morais et al. 2008]. Existem diversos tipos de CFs, sendo as mais utilizadas as de silício cristalino, como a monocristalina e a policristalina, e a de silício amorfo. Nesse cenário, alguns parâmetros são fundamentais para a utilização das CFs, sendo obtidos a partir de sua curva corrente-tensão (I-V) característica. Dentre eles pode-se citar: o rendimento, que indica o valor

percentual da energia solar incidente que é transformada em energia elétrica; a corrente de curto-circuito (I_{sc}), que é a máxima corrente que a CF gera quando sua tensão é zero; a tensão de circuito-aberto (V_{oc}), que é a máxima tensão que a CF gera quando a corrente é nula; a máxima potência (P_{mp}), que indica o pico do produto entre corrente e tensão; a corrente de máxima potência (I_{mp}); e a tensão de máxima potência (V_{mp}). A CF sofre influência da temperatura, portanto são indicados coeficientes de temperatura para I_{SC} e V_{OC} .

A energia elétrica gerada por uma CF depende da irradiância solar, uma grandeza física que indica a densidade de energia solar que incide em uma superfície, por unidade de tempo (W/m^2). A irradiância aumenta gradualmente até atingir um pico próximo às 12:00h, normalmente de $1000W/m^2$, e depois vai diminuindo com o decorrer do dia. A latitude interfere em seu valor devido a inclinação dos raios solares em determinado local, o que influencia na área que essa energia vai ser distribuída [Adaramola 2012]. Na linha do Equador já foram registradas irradiâncias acima de $1200W/m^2$, o que caracteriza uma *overirradiance* [Chase et al. 2018].

O dimensionamento das CFs não é uma tarefa trivial, pois a energia gerada depende dos vários parâmetros da CF, do consumo do SE, que costuma variar dependendo da atividade executada, da irradiância solar sobre a CF, e das características do dispositivo de armazenamento de energia utilizado. Portanto, além do dimensionamento baseado em equações matemáticas, mais teórico, são utilizadas simulações computacionais [Villalva et al. 2009]. Entretanto, dada a grande quantidade de variáveis envolvidas, o dimensionamento necessita de testes reais, expondo o protótipo de SE à luz solar durante períodos de tempo. Cabe ressaltar que uma CF subdimensionada resultará em falta de energia para o SE funcionar, e uma CF superdimensionada resultará em maiores dimensões, massa e custo para o SE.

O teste utilizando a exposição direta do SE ao sol apresenta duas dificuldades. A primeira, e mais problemática, corresponde ao teste depender das condições atmosféricas durante sua realização (sol, chuva, nublado, visibilidade meteorológica), da época do ano, e do local do teste (latitude e longitude), que influem na intensidade da irradiação solar. A segunda corresponde a necessidade de já proteger o protótipo contra a entrada de água, já que ficará exposto às condições do tempo, e isso normalmente é problemático em se tratando de protótipos.

Dado o exposto, ficam nítidas as vantagens de se utilizar simuladores de irradiância. Estes permitem expor o SE sob teste à níveis de irradiância desejados, dentro do laboratório, simulando condições atmosféricas, épocas do ano, e locais diferentes.

No mercado existem alguns simuladores de irradiância, entretanto, são equipamentos de custo elevado, podendo chegar a dezenas de milhares de dólares. Uma pesquisa realizada nos principais bancos de artigos científicos, utilizando-se a *string* “irradiance simulator” OR “sun simulator” OR “solar simulator”, aplicada ao título, retornou 275 artigos. Selecionando-se apenas os trabalhos com objetivo semelhante ao trabalho proposto, e que utilizaram LEDs para gerar a irradiância, resultaram 11. A Tabela 1 resume as principais características desses trabalhos relacionados.

Em relação aos trabalhos da Tabela 1, nenhum permite utilizar um arquivo contendo uma série temporal de irradiância. Além disso, nenhum possui informações de-

Tabela 1: A área corresponde a área de iluminação, localizada a uma certa distância dos LEDs. A classe indica, conforme a norma IEC 60904-9, a tolerância permitida para a discrepância do espectro da luz em relação ao de referência (AM1.5G), a desuniformidade da irradiância na área de iluminação, e a instabilidade da irradiância ao longo do tempo.

Trabalho	Área	Distância	Custo total	Classe
[Tavakoli et al. 2021]	2,3 x 2,3 cm	8,7 cm	–	A
[Sun et al. 2022]	5 x 5 cm	10 cm	–	A
[Lopez-Fraguas et al. 2019]	1 x 1 cm	5 cm	–	A
[Al-Ahmad et al. 2022]	70 cm ²	12 cm	US\$ 710,00	A
[Stuckelberger et al. 2014]	18 x 18 cm	–	–	A
[Novickovas et al. 2015]	19 cm ²	14 cm	–	A
[Novičkovas et al. 2014]	5 x 5 cm	12 cm	–	A
[Aldoshina et al. 2018]	3 cm ²	8,2 cm	–	A
[Meshram and Yadav 2021]	25 x 50 cm	–	–	C
[Vosylius et al. 2022]	14 x 16 cm	27 cm	–	A
[Bazzi et al. 2012]	10 x 5 cm	15 cm	US\$ 1500,00	C

talhadas, como esquemas eletrônicos, *layouts* de placas de circuito impresso, e códigos fonte, que permitam a construção do equipamento.

Dado o exposto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um simulador de irradiância solar de baixo custo (menos de US\$ 100,00), visando preencher uma lacuna nessa área, de forma a facilitar o teste e análise de células fotovoltaicas como fonte de energia em pequenos sistemas embarcados.

2. Materiais e Métodos

A seguir é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento da modelagem sensor, da planta e do sistema em malha fechada ilustrado na Figura 1.

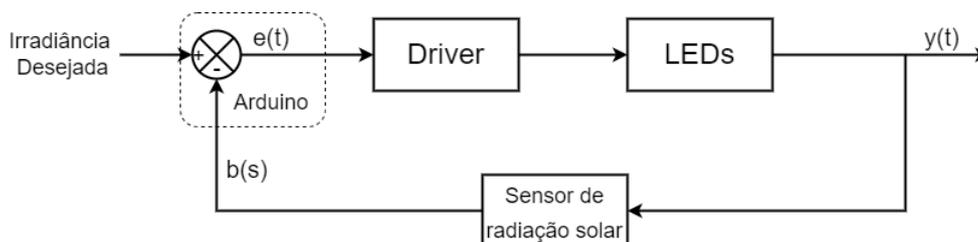


Figura 1: Representação em diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

2.1. Sensor de Radiação Solar

O sensor de radiação solar utilizado consiste em uma CF, conforme [Emery et al. 2012], que descreve o uso de CFs para medir a irradiância solar. Ademais, é demonstrada a relação linear entre a corrente de curto-circuito da CF e a irradiância solar incidente [Erraissi et al. 2017]. A CF utilizada é do tipo monocristalino, marca Anysolar e modelo SM101K09L [ANY SOLAR 2020], medindo 47mm x 23mm, a qual tem seus parâmetros mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros da célula fotovoltaica SM101K09L. Fonte: [ANYSOLAR 2020].

Tensão de circuito-aberto (V_{OC})	6,22 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	41,9mA
Tensão de máxima potência (V_{mp})	5,02V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	39,3mA
Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito (μ_{sc})	18,9 uA/K

Para ler a corrente de curto-circuito (I_{sc}), projetou-se um circuito condicionador de sinal que basicamente mantém a CF em curto-circuito, fornecendo uma tensão diretamente proporcional à corrente. Utilizou-se um resistor *shunt* de $0,1\Omega$, bem abaixo do valor máximo calculado conforme descrito em [Fuentes et al. 2014] ($4,45\Omega$), a fim de garantir a condição de curto-circuito na CF ($I_{sc} + R_{shunt} < 0,03 \times V_{oc}$). Considerando a pequena magnitude do sinal gerado no resistor *shunt*, da ordem de milivolts, utilizou-se um amplificador de instrumentação (AI) para amplificá-la, melhorando assim a relação sinal-ruído devido a elevada razão de rejeição em modo comum (CMRR) que esse dispositivo apresenta. Utilizou-se o AI AD627 [ANALOG DEVICES 2013], cujo ganho é definido por um resistor externo (R_g), pode ser alimentado por uma fonte unipolar e sua saída é *rail-to-rail*. O ganho do AI ($G=470$, $R_g = 430\Omega$) foi definido de forma que uma irradiância de $1600W/m^2$ (*overirradiance*) gere uma tensão de 3,3 V em sua saída, melhorando a resolução do medidor. Essa tensão de saída é aplicada em uma entrada analógica de um Arduino Leonardo.

A irradiância é calculada a partir da corrente de curto-circuito por meio da Equação 1 [Ibrahim and Anani 2017].

$$I_{SC}(G, T) = \frac{G}{G_{STC}} [I_{SC,STC} + \mu_{I_{SC}}(T - T_{STC})] \quad (1)$$

Onde $I_{SC}(G, T)$ é a corrente de curto-circuito (A); $I_{SC,STC}$ é a corrente de curto-circuito em STC (A); G_{STC} é a irradiância em STC ($1000W/m^2$); G é a irradiância incidente (W/m^2); T é a temperatura da CF (K); T_{STC} é a temperatura em STC (298,15 K); e $\mu_{I_{SC}}$ é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito (K/A).

A CF utilizada (SM101K09L) tem uma $I_{SC,STC}$ de 41,9 mA e um $\mu_{I_{SC}}$ de 18,9 uA/K. Desse modo, a corrente de curto-circuito (I_{SC}) e a temperatura da CF (T) são medidas, e a irradiância incidente (G) é calculada isolando-a na equação 1. A influência da temperatura da CF na I_{SC} é relativamente pequena, em torno de 1% para uma variação de 25 °C, a $1000W/m^2$. Utilizou-se a temperatura do ar como sendo a temperatura da FC, proporcionando assim uma certa correção das medidas. A temperatura do ar é medida no SIMIRSOL por meio de um sensor disponível no módulo RTC DS3231, conectado ao Arduino via barramento I²C.

2.2. LEDs e Driver

Dadas as vantagens dos LEDs na geração de irradiância solar, citadas nos trabalhos da Tabela 1, optou-se em utilizar esse tipo de dispositivo. Realizou-se vários testes com diferentes tipos de LEDs, sendo o mais adequado um conjunto de LEDs retirado de um refletor de uso automotivo, 12 V / 50 W, com “temperatura da cor” de 6000 K. O conjunto

de LEDs foi posicionado à 5 centímetros da CF (Figura 2), de forma a se obter irradiâncias de até $1300W/m^2$.

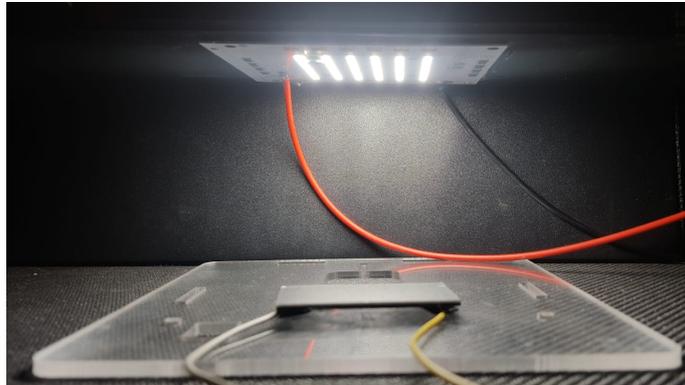


Figura 2: Conjunto de LEDs posicionado à 5 centímetros de distância da CF.

O controle da intensidade luminosa emitida pelo conjunto de LEDs é feito por meio de uma fonte de corrente controlada por tensão (FCCT). Essa FCCT permite que o Arduino faça o controle da luminosidade dos LEDs de acordo com a irradiância desejada.

O Arduino Leonardo não possui um conversor digital-analógico (DAC) integrado, assim não é possível controlar diretamente a FCCT. Para gerar uma tensão analógica, de forma simples e barata, utilizou-se um filtro RC.

A fonte de corrente controlada por tensão foi implementada com o auxílio de um amplificador operacional (LMC6482), um MOSFET canal N (IRFZ46N) com dissipador de calor (15 cm^2), e um resistor, conforme mostrado na Figura 3.

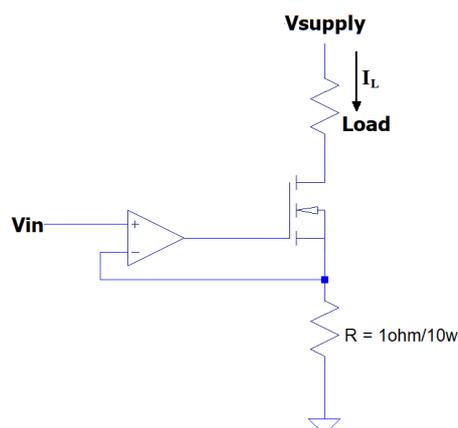


Figura 3: Circuito eletrônico da fonte de corrente controlada por tensão utilizada

Devido ao curto-circuito virtual, proporcionado pelo Ampop, a tensão na entrada inversora (-) será igual a V_{in} . Consequentemente, a tensão no resistor R também será igual a V_{in} , e sua corrente será igual à V_{in}/R . Como as correntes na entrada inversora (-) e no gate do MOSFET podem ser consideradas como nulas, tem-se que a corrente na carga (I_L) será igual à V_{in}/R .

2.3. Controlador

Para manter a irradiância no valor desejado utilizou-se um controlador PI digital (Proporcional-Integral digital), implementado no *firmware* do Arduino por meio da biblioteca PID_v1. Para sintonizar o controlador, obtendo os seus parâmetros (valores das constantes K_p , T_i e T_d), utilizou-se o segundo método experimental de Ziegler-Nichols. Inicialmente foi colocado um compensador proporcional, aumentando o valor de K_p de 0 até um valor crítico K_{cr} , em que o sistema começou a ter oscilações sustentadas, com período crítico (P_{cr}). Assim, foi possível obter os valores de K_p , T_i (tempo de integração) e T_d (tempo de derivação) de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Sintonia por meio do segundo método de Ziegler-Nichols, feita com base no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} . Fonte: [Ogata 2010].

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$0.834P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.1255P_{cr}$

O SIMIRSOL foi montado em matriz de contatos e utilizou-se uma fonte chaveada de 12V/5A (115mm x 80mm x 40mm) para energizá-lo. A programação foi realizada na IDE Arduino, em linguagem C++. O *firmware* desenvolvido permite utilizar como entrada um arquivo de valores separados por vírgula (.csv), com os valores de irradiância no decorrer do dia, que são utilizados como valores desejados para o controlador (*setpoints*).

3. Resultados e Discussão

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos testes realizados com o SIMIRSOL.

3.1. Controlador PI

A sintonia do controle em malha fechada, como já citado, foi realizada utilizando o segundo método de Ziegler-Nichols. Realizando esse processo, foi possível chegar ao valor de $K_{cr} = 0,125$, para qual o sistema começou a apresentar oscilações sustentadas pela primeira vez, com o período (P_{cr}) de $205ms$ (Figura 4).

Assim, com os valores de K_{cr} e P_{cr} pode-se aplicar a sintonia proposta pela Tabela 3, sendo que primeiramente foi analisado se apenas uma ação de controle proporcional (P) resultaria no controle desejado. A saída do sistema com um $K = 0,0625$ conforme a equação 2, para uma entrada degrau de $500W/m^2$, apresentou um erro estacionário de aproximadamente 54% na irradiância. Portanto, verificou-se que apenas a ação proporcional (P) não apresenta uma saída satisfatória, devido ao seu elevado erro estacionário.

$$C(s) = 0,5K_{cr} = 0,0625 \quad (2)$$

Na sequência, foi projetado um controlador PI, com seus parâmetros calculados conforme a Equação 3. A resposta a uma entrada degrau ($500W/m^2$), é mostrada na Figura 5.

$$C(s) = 0,45K_{cr} + 0,54\frac{K_{cr}}{P_{cr}s} = 0,05625 + 0,3292683s \quad (3)$$

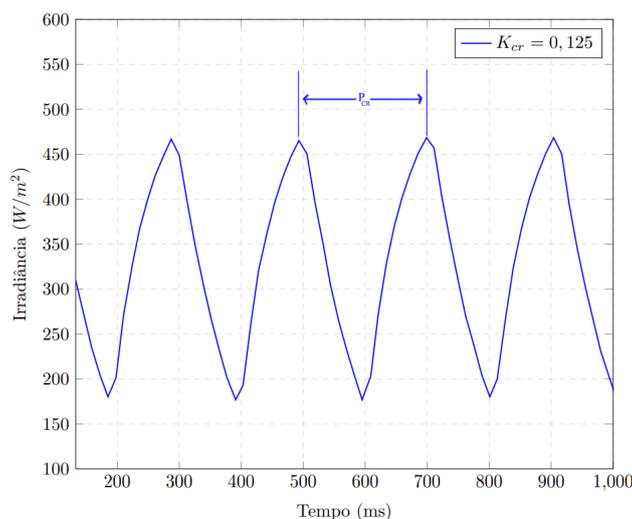


Figura 4: Saída com oscilações sustentadas, com o $K_{cr} = 0,125$ e $P_{cr} = 205ms$.

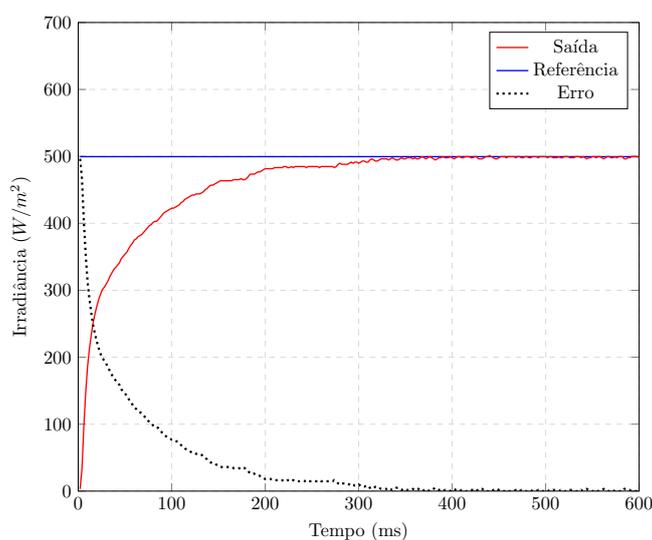


Figura 5: Saída do sistema utilizando o controlador PI projetado.

A saída do controlador PI não apresenta *overshoot*, tem o tempo de acomodação de 190 ms, para o critério de 5%, e 280 ms para o critério de 2%. Percebe-se que o controlador PI apresentou um comportamento satisfatório permitindo se obter uma irradiância com um erro estacionário próximo de zero, e um tempo de acomodação muito pequeno, considerando o tipo de grandeza física controlada.

3.2. Testes com Irradiâncias Reais

Dados reais de radiação solar foram obtidos no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no qual é possível obter dados de irradiância dos últimos 6 meses, registrados com intervalo de 1 h por estações meteorológicas instaladas em todo o país.

Para acelerar o tempo de execução dos testes, os valores de irradiância (*setpoints*) foram atualizados a cada 10 s, ao invés de 1 h. Assim, a variação de irradiância ocorrida

em 12 h pode ser gerada em 120 s. A seguir são descritos os testes considerando três condições diferentes: céu limpo, céu com nuvens, e céu nublado.

3.2.1. Simulação da Irradiância com Céu Limpo

A Figura 6 mostra a saída do sistema de controle com os dados do dia 30/08/2021. Cabe observar que nessa figura, e nas seguintes, os valores de saída (linha vermelha contínua) correspondem aos valores medidos pelo sensor de radiação solar desenvolvido. Percebe-se na Figura 6 que a saída mostra a resposta de um sistema de primeira ordem às sucessivas entradas degrau, correspondentes às mudanças do valor da irradiância de referência.

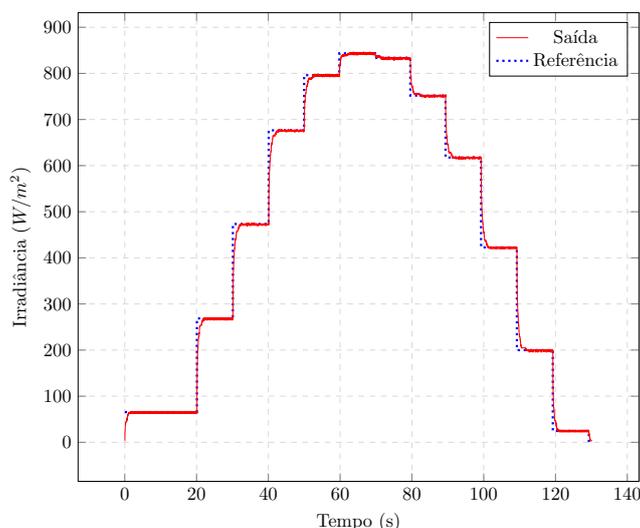


Figura 6: Teste realizado com radiação solar do dia 30/08/2021, registrada em Campo Grande-MS por uma estação meteorológica do INMET.

Como esperado, o sistema não apresenta nenhum *overshoot* com a variação da irradiância no decorrer do dia. A maior variação na irradiância provocou um degrau de $204W/m^2$, cujo tempo de acomodação foi de 180 milissegundos (critério de 2%).

3.2.2. Simulação da Irradiância com Nuvens

A presença de nuvens provoca variações elevadas e abruptas na irradiância solar. A Figura 7 ilustra a resposta do sistema com esses dados de entrada.

Na Figura 7a ocorreu uma queda no valor da irradiância de aproximadamente $191W/m^2$, em 80 segundos da simulação, causada pela presença de nuvens, sendo que a saída estabilizou em 172 ms (critério de 2%). Já a Figura 7b, houve uma queda de aproximadamente $300W/m^2$ e o tempo de acomodação da saída foi de 214ms (critério de 2%).

Isso mostra que o sistema consegue simular o impacto das nuvens nos dados de radiação solar, estabilizando a saída em um tempo satisfatório, sem apresentar um elevado erro estacionário. Em simulações “mais realistas”, com a irradiância mudando a cada 1 h, esses tempos de acomodação, menores que 0,3 s, serão insignificantes.

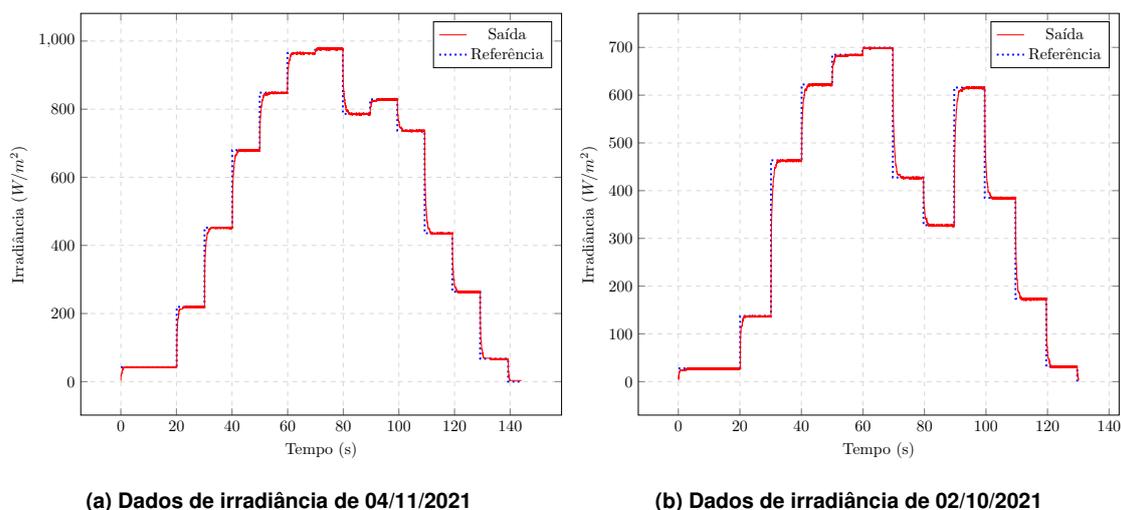


Figura 7: Testes realizados com irradiâncias de dias com nuvens, registradas em Campo Grande-MS por uma estação meteorológica do INMET.

3.2.3. Simulação da Irradiância com Dia Nublado

A Figura 8 mostra a saída do sistema com dados de radiação solar de 10/10/2021, um dia nublado com chuva moderada, o qual teve uma irradiância média de $47W/m^2$ e um pico de $190W/m^2$.

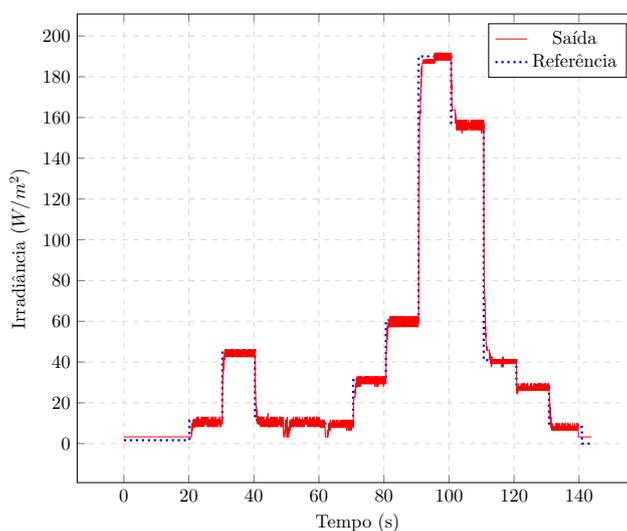


Figura 8: Teste com radiação solar do dia 10/10/2021, registrada em Campo Grande-MS.

Nota-se que a saída apresentou um erro considerável para baixos valores de irradiância ($< 30W/m^2$). Na geração do valor de $11W/m^2$, correspondente a radiação do início do dia, ocorreu uma diferença de aproximadamente 15% entre o valor desejado e o valor de saída (medido). Verificou-se que esse erro na saída (irradiância) ocorre devido à baixa resolução do sistema. A saída PWM do Arduino utiliza um valor entre 0 e 255 para definir o ciclo de trabalho, que é convertido em tensão e depois em corrente nos LEDs. Com isso, considerando que a irradiância máxima gerada pelos LEDs é de

$1300W/m^2$, tem-se uma resolução de aproximadamente $5W/m^2$ ($1300/256$). Ou seja, quando a irradiância gerada está variando, ela varia com incrementos, ou decrementos, de $5W/m^2$.

Na geração de irradiâncias elevadas, em torno de $1000W/m^2$, esse erro é menos significativo e imperceptível nos gráficos. Já na geração de irradiâncias baixas, em torno de $20W/m^2$, esse erro é mais significativo e perceptível nos gráficos.

4. Conclusão

O presente trabalho desenvolveu um sistema para simulação de irradiância solar (SIMIRSOL), utilizando um sensor de radiação solar baseado em uma pequena CF, um conjunto de LEDs para gerar a luz ($1300W/m^2$ à 5 centímetros, em 30 cm^2 , já descontada a área da CF do sensor), e um controlador PI implementado digitalmente em um Arduino. Com o SIMIRSOL pode-se testar e analisar o funcionamento de pequenas sistemas eletrônicos energizados por CFs, simulando dias com céu limpo, com nuvens, nublado e chuvoso, dentro do laboratório sem depender das condições climáticas externas.

Os testes utilizando dados reais de irradiância, de dias com céu limpo e com a interferência das nuvens, foram satisfatórios. O sistema de controle apresentou resultados sem a presença de *overshoot*, e com um tempo de acomodação de 280ms, para uma entrada degrau de $500W/m^2$.

A baixa resolução obtida ($5W/m^2$) na geração dos valores de irradiância, mais significativa em baixas irradiância, não impossibilita a utilização do sistema na maioria dos casos. Entretanto, pode-se melhorar a resolução facilmente utilizando um conversor digital-analógico de 10 bits ou mais, conectado ao Arduino, para gerar a tensão que controla a FCCT, ao invés do PWM com filtro RC.

O erro estimado para a irradiância gerada pelo SIMIRSOL, por meio da raiz da soma dos quadrados, foi de 12,5 % ($12,5 = \sqrt{10^2 + 5^2 + 5^2 + 2^2}$), considerando o erro da própria CF do sensor ($\pm 10\%$), resistor *shunt* e resistor que define o ganho do AI ($\pm 5\%$), e conversor analógico-digital do Arduino Leonardo ($\pm 2\%$). Fica evidente que a exatidão do SIMIRSOL pode ser melhorada utilizando-se uma CF com erro menor, principalmente. Cabe observar que o erro do conjunto de LEDs, assim como de outros dispositivos, são eliminados pelo controle em malha fechada. Os trabalhos citados na Tabela 1 não apresentam o erro da irradiância gerada, uma vez que são sistemas em malha aberta, sendo a irradiância obtida por meio de um medidor independente.

Como os resultados foram promissores, será realizada a caracterização da classe do SIMIRSOL (A, B ou C) em um laboratório de óptica, conforme definido na norma IEC 60904-9, e a construção de um *site* com instruções e informações detalhadas para construção do SIMIRSOL.

Como sugestões de trabalhos futuros pode-se citar: implementar no *firmware* do Arduino um algoritmo de interpolação, para obter valores intermediários de irradiância, de forma que a irradiância simulada varie de forma suave; e acrescentar um sistema para controlar a temperatura da CF sob teste, simulando o aquecimento gerado pelo sol.

Por fim, o SIMIRSOL possui dois diferenciais que o destacam em relação aos trabalhos semelhantes, a capacidade de utilizar um arquivo contendo a irradiância ao longo do tempo, e o baixo custo, aproximadamente US\$ 70,00 FOB (*Free on Board*) para o

protótipo. Portanto, acredita-se que esse trabalho fez uma contribuição científica importante.

Agradecimentos

O trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul–UFMS/MEC/Brasil, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES/Brasil.

Referências

- Adaramola, M. (2012). Estimating global solar radiation using common meteorological data in akure, nigeria. *Renewable Energy*, 47:38–44.
- Al-Ahmad, A., Clark, D., Holdsworth, J., Vaughan, B., Belcher, W., and Dastoor, P. (2022). An economic led solar simulator design. *IEEE journal of photovoltaics*, 12(2):521–525.
- Aldoshina, O., Yugay, V., Kaliaskarov, N., Esenjolov, U., and Nesipova, S. (2018). Solar simulator on the basis of powerful light-emitting diodes. *MATEC web of conferences*, 155:1035.
- ANALOG DEVICES (2013). Micropower, single- and dual-supply, rail-to-rail instrumentation amplifier ad627. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD627.pdf>.
- ANYSOLAR (2020). Ixolartm high efficiency solarmd. <https://waf-e.dubudisk.com/anysolar.dubuplus.com/techsupport@anysolar.biz/O18Ae09/DubuDisk/www/Gen3/SM101K09L\%20DATA\%20SHEET\%20202007.pdf,urldate=2019-11-08>.
- Bazzi, A. M., Klein, Z., Sweeney, M., Kroeger, K. P., Shenoy, P. S., and Krein, P. T. (2012). Solid-state solar simulator. *IEEE transactions on industry applications*, 48(4):1195–1202.
- Chase, O., Teles, M., Rodrigues, M., De Almeida, F., Macêdo, W., and Junior, C. (2018). A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. *Sensors*, 18:2685.
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5):385–418.
- Emery, K., Meydbray, J., and Kurtz, S. (2012). Pyranometers and reference cells, the difference. *PV Magazine*, 4:108–110.
- Erraissi, N., Aarich, N., Akhsassi, M., Mustapha, R., and Bennouna, A. (2017). An inexpensive and accurate solar irradiance sensor based in a small calibrated pv module.
- Fuentes, M., Vivar, M., Burgos, J., Aguilera, J., and J.A.Vacas (2014). Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for pv system monitoring using arduino (tm) that complies with iec standards. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130:529–543.
- Ibrahim, H. and Anani, N. (2017). Variations of pv module parameters with irradiance and temperature. *Energy Procedia*, 134.

- Lopez-Fraguas, E., Sanchez-Pena, J. M., and Vergaz, R. (2019). A low-cost led-based solar simulator. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 68(12):4913–4923.
- Meshram, N. D. and Yadav, P. J. (2021). Design of a low cost solar simulator by using light emitting diode (led). *Journal of physics. Conference series*, 1921(1):12103.
- Morais, R., Matos, S. G., Fernandes, M. A., Valente, A. L., Soares, S. F., Ferreira, P., and Reis, M. (2008). Sun, wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2):120–132.
- Novickovas, A., Baguckis, A., Mekys, A., and Tamosiunas, V. (2015). Compact light-emitting diode-based aaa class solar simulator: Design and application peculiarities. *IEEE journal of photovoltaics*, 5(4):1137–1142.
- Novičkovas, A., Baguckis, A., Vaitkūnas, A., Mekys, A., and Tamošiūnas, V. (2014). Investigation of solar simulator based on high-power light-emitting diodes. *Lithuanian journal of physics*, 54(2):114–119.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. Pearson Education.
- Oliveira, L., Messagie, M., Rangaraju, S., Sanfelix, J., Hernandez Rivas, M., and Van Mierlo, J. (2015). Key issues of lithium-ion batteries – from resource depletion to environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 108:354–362.
- Stuckelberger, M., Perruche, B., Bonnet-Eymard, M., Riesen, Y., Despeisse, M., Haug, F.-J., and Ballif, C. (2014). Class aaa led-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking. *IEEE journal of photovoltaics*, 4(5):1282–1287.
- Sun, C., Jin, Z., Song, Y., Chen, Y., Xiong, D., Lan, K., Huang, Y., and Zhang, M. (2022). Led-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations. *Solar energy*, 233:96–110.
- Tavakoli, M., Jahantigh, F., and Zarookian, H. (2021). Adjustable high-power-led solar simulator with extended spectrum in uv region. *Solar energy*, 220:1130–1136.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208.
- Vosylius, Z., Novickovas, A., Laurinavicius, K., and Tamosiunas, V. (2022). Rational design of scalable solar simulators with arrays of light-emitting diodes and double reflectors. *IEEE journal of photovoltaics*, 12(2):512–520.