Desenvolvimento de um Caracterizador de módulos fotovoltaicos Utilizando Plataforma WEB

Luis Antônio Gregório Lopes * **Davi Caetano da Silva Junior** *
Heverton Augusto Pereira * **Victor Dardengo** *
Allan Fagner Cupertino ** **Erick Matheus da Silveira Brito** ***

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, (e-mails: [luis.a.lopes, davi.junior, victor.dardengo, heverton.pereira]@ufv.br)*
** *Departamento de Energia Elétrica,Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil (e-mail: allan.cupertino@ufjf.br)*
*** *Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Florestal, MG, Brasil (e-mail: erick.brito@ufv.br)*

Abstract: This paper describes a prototype of a photovoltaic Module characterizer that uses the capacitive load method. The system is controlled by a *Gate Driver* circuit operated by the ESP32 microcontroller, which collects voltage measurements during the capacitor charging process and calculates the subsequent current signal. Additionally, it has its own interface that allows communication with the device via the internet. This functionality enables access to and control of the characterizer through mobile devices, eliminating the need to install additional applications. Due to its simplicity, the device is low-cost compared to commercial versions, which generally use two sensors—one to measure current and another to measure the voltage of the photovoltaic Module. In the proposed methodology, only one voltage sensor is used, which is a distinctive feature of this work.

Resumo: Este artigo descreve um protótipo de caracterizador de módulos fotovoltaicos que utiliza o método de carga capacitiva. O sistema é controlado por um circuito de *Gate Driver* operado pelo microcontrolador ESP32, que coleta medições de tensão durante o processo de carga do capacitor e calcula o sinal de corrente subsequente. Além disso, possui uma interface própria que permite a comunicação com o dispositivo via internet. Essa funcionalidade possibilita o acesso e controle do caracterizador por dispositivos móveis, eliminando a necessidade de instalar aplicativos adicionais. Devido à sua simplicidade, o dispositivo é de baixo custo quando comparado a versões comerciais, que geralmente utilizam dois sensores – um para medir a corrente e outro para medir a tensão do módulo fotovoltaico. Na metodologia proposta, utiliza-se apenas um sensor de tensão, o que constitui um diferencial do trabalho.

Keywords: Solar Characterizer; Photovoltaic Module; Internet of Things (IoT); Cloud Platform
Palavras-chaves: Caracterizador Solar; módulo fotovoltaico; Internet das Coisas(IoT); Plataforma em nuvem

1. INTRODUÇÃO

Na busca por fontes de energia renováveis com um forte foco na rentabilidade financeira, os sistemas fotovoltaicos estão ganhando cada vez mais destaque na matriz elétrica brasileira. Entre janeiro e setembro de 2023, o Brasil registrou o maior aumento na capacidade de geração solar centralizada da sua história, atingindo 3 GW, um crescimento de 20% em relação aos 12 meses do ano anterior (Ministério de Minas e Energia, 2023). Um dos principais impulsionadores desse crescimento é a contínua redução dos custos associados à geração fotovoltaica e as melhorias na eficiência operacional (Livera et al., 2019).

Com os módulos fotovoltaicos avançando constantemente em eficiência e potência, a medição de desempenho e a detecção de falhas específicas tornam-se ainda mais cruciais. Para garantir a conformidade com as características esperadas, conforme a garantia do módulo fotovoltaico, é necessário considerar que as informações contidas nas fichas técnicas do fabricante geralmente se referem apenas às variáveis elétricas fotovoltaicas em dois pontos de ope-

⋆ Os autores agradecem o suporte fornecido pelo projeto de P&D ANEEL/CEMIG D0727, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologico) - projetos 408059/2021-4, 313868/2023-9, 443170/2023-1, 407926/2023-2; FAPEMIG (Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais) - projetos APQ-02556-21, APQ-03164-24, RED-00216-23 e PCE-00383-24 e ao Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE). Além disso, este trabalho contou com suporte da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) - Código de financiamento 001 e o programa de excelência acadêmica (PROEX).

ração: as condições de teste padrão (STC) e a temperatura nominal de operação da célula (Pereira et al., 2021). Portanto, para qualquer outra condição climática, as curvas I-V (corrente x tensão) e P-V (potência x tensão) precisam ser medidas ou extrapoladas a partir de modelos numéricos (Basoglu and Çakir, 2015).

Nas usinas fotovoltaicas, os módulos fotovoltaicos são organizados em arranjos, geralmente através de conexões série-paralela ou paralela-série. Idealmente, ambos os métodos são equivalentes quando todas as células e módulos são idênticos e operam sob as mesmas condições (Zheng et al., 2012). No entanto, o desempenho dos módulos fotovoltaicos pode ser afetado por uma série de fatores locais e falhas operacionais, incluindo a degradação das células fotovoltaicas, mau funcionamento do inversor, falha na instalação e interligação dos módulos, falhas de solda, trincas nas células, e a presença de poeira ou sujeira (Alam et al., 2024). Considerando que os módulos fotovoltaicos não operam individualmente, qualquer falha em um módulo afetará todos os outros conectados a ele, impactando o desempenho geral da usina solar (Belik and Nohacova, 2020).

Diante desse cenário, diferentes abordagens foram exploradas para a detecção de problemas em módulos fotovoltaicos. Estudos anteriores (Kozsely et al., 2022; Lee et al., 2018) propuseram um sistema que utiliza drones equipados com câmeras térmicas e RGB para identificar módulos solares defeituosos. A detecção de falhas é feita comparando imagens térmicas, enquanto as câmeras RGB são usadas para localizar a posição do módulo fotovoltaico. Além disso, o estudo Padmavathi and Chilambuchelvan (2017) desenvolveu um sistema automatizado para detectar pequenas rachaduras na superfície dos módulos usando comunicação *Bluetooth*. O microcontrolador estima a saída do sensor e, se estiver abaixo de um limite predefinido, envia um alerta para um dispositivo móvel Android. Também pode ser utilizada a técnica de espectroscopia de impedância modulada por intensidade de luz (LIMIS), que varia senoidalmente a intensidade da luz incidente no módulo e mede a resposta do módulo para extrair características de corrente alternada. Os valores de impedância celular obtidos são úteis para avaliar a degradação das células fotovoltaicas (Simatupang et al., 2023).

Neste trabalho, são integrados métodos já existentes para a caracterização dos módulos fotovoltaicos. O método central utilizado é o caracterizador baseado em carga capacitiva, reconhecido como um dos mais precisos para traçar as curvas características I-V e P-V dos módulos fotovoltaicos. A proposta envolve o carregamento de um capacitor desde o curto-circuito até o circuito aberto, enquanto são coletadas medidas de corrente e tensão (Brito et al., 2014). Utilizando o microcontrolador ESP32 e um circuito de *Gate Driver*, dois IGBTs são alternados para conectar e desconectar o capacitor ao módulo fotovoltaico durante os processos de carga e descarga. Para a aquisição dos dados, é utilizado somente o sensor de tensão, que também é empregado para determinar a corrente do módulo fotovoltaico, o sensor de corrente é excluído desse protótipo com a finalidade de torna o caracterizador ainda mais simples, e de menor custo. Além disso, o microcontrolador comunica-se com um site desenvolvido com o sistema de comunicação para *Bluetooth Low Energy*, utilizando uma API de WEB *Bluetooth*. Após a conclusão dessas etapas, o usuário pode baixar todos os dados do sistema, caso seja necessário.

2. SISTEMA E DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA

Esta seção fornece uma visão geral do sistema do caracterizador solar, detalhando o método de carga capacitiva. Também aborda a plataforma WEB *GTracer* com layout IoT e a interface do usuário, oferecendo uma compreensão completa do funcionamento e da interface do sistema.

2.1 Hardware utilizado

A Figura 1 ilustra o sistema de um caracterizador solar fotovoltaico, cuja função é obter as curvas características de um sistema fotovoltaico por meio da medição das variáveis elétricas envolvidas no processo. O princípio básico de medição da curva I-V é baseado no controle da corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico, desde o ponto de curto-circuito até o ponto de circuito aberto (Cavalcante Junior et al., 2024). Para realizar essa tarefa, é utilizado o método de carga capacitiva, que envolve o módulo fotovoltaico a ser caracterizado, dois IGBT's, um capacitor, uma resistência de descarga e um sensor de tensão integrado ao microcontrolador ESP32.

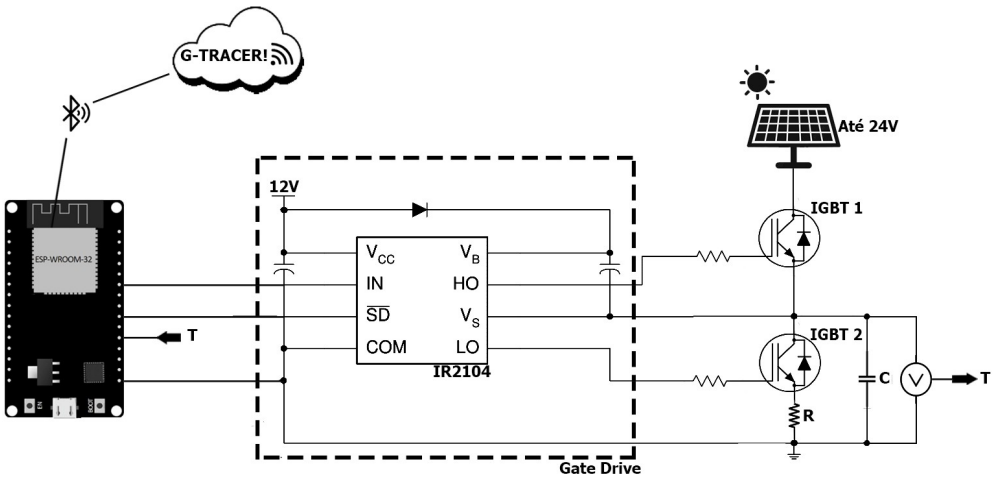


Figura 1. Caracterizador fotovoltaico integrado com a platarforma *GTracer*.

No funcionamento do sistema, os IGBT's são acionados de forma complementar por meio de um circuito chamado *Gate Driver*. Durante o processo de carga, após o comando dado pela plataforma WEB *GTracer*, a chave IGBT1 é fechada e a IGBT2 permanece aberta. Nesta etapa, o capacitor, inicialmente descarregado, é conectado ao módulo fotovoltaico e o processo de carga é iniciado, aumentando gradualmente seu nível de tensão de zero até atingir a tensão de circuito aberto do Módulo. O tempo que esse processo leva, depende da propria tensão de circuito aberto, da corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico, do valor da capacitância. Conforme a tensão nos terminais do capacitor aumenta ao longo do tempo, o valor dessa grandeza é coletado por meio do sensor de tensão e enviado ao microcontrolador ESP32 para processamento.

Após o tempo necessário para que o capacitor esteja completamente carregado, inicia-se o processo de descarga. Nesta etapa, a chave IGBT1 para de conduzir e IGBT2 entra em estado de condução. Tem-se, portanto, um circuito RC simples, onde o capacitor irá descarregar toda a sua energia na resistência R. Esta etapa tem por fundamento apenas descarregar o capacitor, não sendo necessário fazer nenhuma coleta de dados. Assim que o capacitor estiver completamente descarregado, o analisador aguarda um novo comando da plataforma para reiniciar o processo.

O caracterizado desenvolvido neste trabalho representa o estágio inicial de um projeto em andamento. Atualmente em fase de desenvolvimento, este protótipo tem a capacidade de caracterizar módulos fotovoltaicos de até 24 V e 1 A. O objetivo principal do projeto é criar um equipamento versátil, capaz de caracterizar uma variedade de módulos fotovoltaicos já instalados e disponíveis no mercado. Para atender a essa demanda, o analisador final será projetado para suportar tensão de até 100 V e corrente de até 20 A. Com essa capacidade expandida, será possível realizar análises detalhadas e precisas em uma ampla gama de módulos fotovoltaicos, contribuindo para o desenvolvimento e otimização de sistemas fotovoltaicos.

2.2 Software Desenvolvido

O sistema desenvolvido tem como objetivo principal oferecer rapidez na apresentação gráfica e uma interface simples e eficiente (vide Figura 2), para que o usuário possa utilizar em qualquer plataforma. Trata-se de um sistema robusto, capaz de gerar gráficos de tensão, corrente e potência ao longo do tempo, além de corrente por tensão. O sistema possui a funcionalidade de se comunicar com o ESP32 utilizando a API WEB *Bluetooth* Beaufort (2015), atualmente disponível para *ChromeCast, MacOS, Android e Windows*, o que permite ao usuário utilizá-lo e acessá-lo por meio de dispositivos móveis, como smartphones, tablets e notebooks. Isso possibilita que o usuário, mesmo estando em campo executando uma tarefa, consiga diagnosticar rapidamente um problema com uma célula fotovoltaica.

Ao equiparar a plataforma, que oferece acesso gratuito (com o hardware sendo pago, mas de baixo custo), com outras opções, percebe-se que os valores e gráficos gerados são semelhantes (vide Figura 3). A plataforma não requer programação do usuário para a geração de gráficos e pode ser utilizada por qualquer pessoa, garantindo acesso completo aos dados gerados.

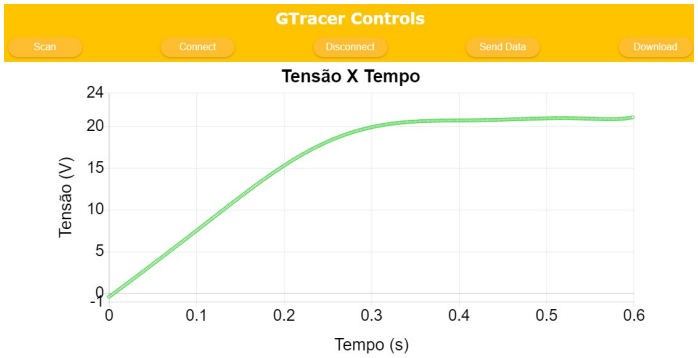
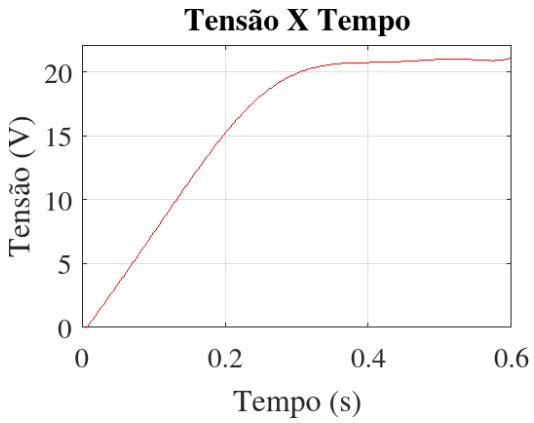
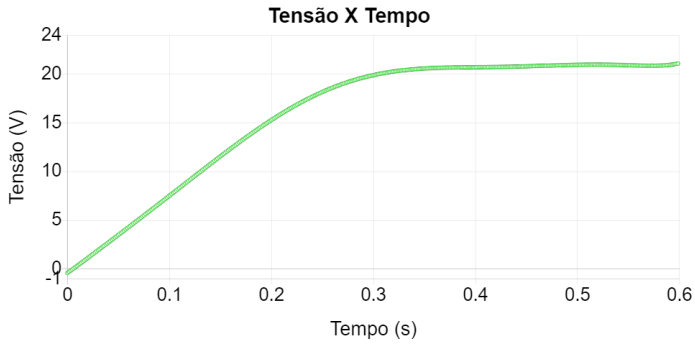


Figura 2. Interface gráfica da plataforma WEB *GTracer*.



(a) Gráfico desenvolvido pela plataforma Matlab.



(b) Gráfico desenvolvido pela plataforma WEB *GTracer*.

Figura 3. Comparando os mesmos gráficos elaborados em diferentes plataformas (Matlab e WEB *GTracer*).

O site foi desenvolvido utilizando a estrutura de desenvolvimento de sites, com HTML como estrutura do sistema WEB, CSS responsável pela parte de animações e visual gráfico do sistema, e JavaScript responsável pela codificação. A estrutura de comunicação entre a plataforma e o microcontrolador é analisada detalhadamente a seguir.

Para essa comunicação, o *Bluetooth Low Energy* disponibilizado pelo ESP32 é utilizado. Em muitas situações de campo, o usuário pode não ter acesso à plataforma via internet. Nesse contexto, o *Bluetooth* permite a comunicação mesmo sem conexão com a internet, garantindo a comunicação entre a plataforma e o dispositivo *GTracer*. Ao estabelecer a comunicação entre o microcontrolador e a plataforma clicando no botão Scan (vide Figura 2), que procura todos os dispositivos *GTracer* na região, o usuário clica em Connect, estabelecendo assim a conexão com a

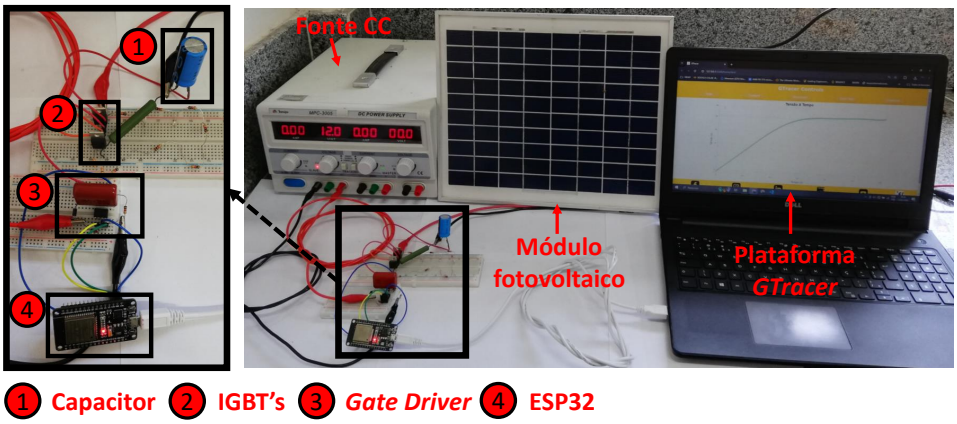


Figura 4. Configuração experimental do caracterizador de módulo fotovoltaico.

plataforma WEB. Após esses passos, o usuário pode clicar em Send Data.

Em seguida, o sistema da plataforma, que está conectado diretamente ao microcontrolador, envia para ele um comando de 8 bits. Assim que a informação chega ao microcontrolador, ele inicia o processo de carga do capacitor, conforme mencionado anteriormente. Após esse processo, ele faz a leitura de 400 pontos utilizando interrupções de 1,5 milissegundos por ponto, totalizando um tempo de 0,6 segundos. Após esse intervalo de tempo, todos os pontos lidos são enviados para a plataforma WEB ainda utilizando a conexão Bluetooth. São enviados 100 pontos com 4 números de 8 bits cada, com o objetivo de reduzir o tempo de envio e as perdas de dados na comunicação entre eles.

Com os valores na plataforma, ocorre o processo de conversão para valores de tensão, uma vez que os valores chegam à plataforma na leitura de 0 a 4095, provenientes do microcontrolador. Ao converter os valores, é aplicada uma função de regressão polinomial de oitava ordem para corrigir pontos que tenham sido lidos fora do padrão esperado sem alterar o desenho da curva. Após esse processo, começa a produção dos gráficos para o usuário, tudo isso em menos de 2 segundos.

3. ESTUDO DE CASO

A Figura 4 ilustra o arranjo experimental. No sistema, o microcontrolador ESP32 desempenha o papel de coordenador do processo, encarregado de processar os dados recebidos e executar instruções do programa, incluindo o envio de comandos para o circuito de *Gate Driver* responsável por realizar a comutação simultânea de dois IGBT K28EES5 (Vce=650 V, Ic=28 A). Seu funcionamento baseia-se na técnica *Bootstrap*, que utiliza capacitores e um circuito integrado comutador IR2104. Esse dispositivo permite o carregamento do capacitor pela fonte de alimentação de entrada e, posteriormente, utiliza a energia armazenada no chaveamento dos IGBTs, conforme mostrado na Figura 1 e detalhado na folha de dados do próprio dispositivo (Infineon-IR2104, 2024).

Os dois IGBTs empregados são responsáveis, um por carregar o capacitor e outro pela descarga. O capacitor utilizado possui uma capacitância de 1000 uF e 50 V. Simultaneamente ao acionamento do IGBT pelo microcontrolador através do circuito de *Gate Driver*, também é responsável pela leitura do sinal de tensão, utilizando o sistema de interrupção do ESP32 para coletar um dado por interrupção. Para garantir que essa tensão não ultrapasse o limite de 3,3 V suportado pelo ESP32, uma vez que o módulo fotovoltaico utilizado para teste é o SSA10W-12 (Tensão de circuito aberto, Voc= 22.7 V, e Corrente de curto-circuito, Isc= 0.6 A, com uma tolerância de saída de 3%), é projetado um circuito simples de divisor de tensão utilizando 8 resistores de 1 kΩ. Os valores lidos na porta do microcontrolador variam de 0 a 4095 bits e são enviados para a plataforma desenvolvida, onde são devidamente tratados para plotar a curva I-V.

Como anteriormente indicado neste artigo, a corrente na fase de carga do capacitor não é quantificada por meio de qualquer sensor de corrente específico, mas sim derivada dos próprios registros de tensão coletados. Essa abordagem se fundamenta na fórmula da corrente do capacitor, conforme segue:

$$I_c = C \cdot \frac{dv_c}{dt} \tag{1}$$

Onde I_c é a corrente do capacitor, C é a capacitância e v_c é a tensão do capacitor.

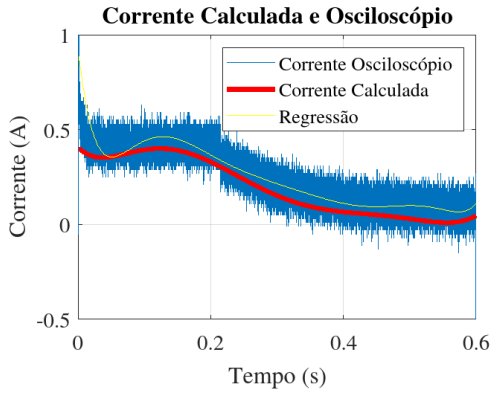


Figura 5. Comparação do sinal de corrente obtido no osciloscópio com os sinais calculados.

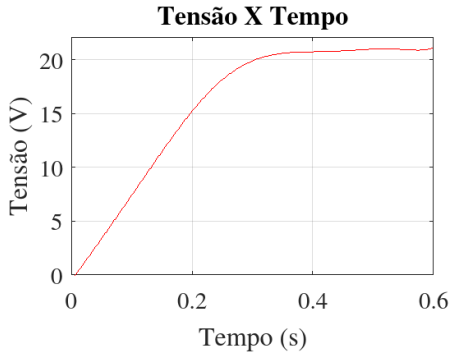
Dado que a coleta de dados por interrupção resulta em valores de tensão uniformemente distribuídos ao longo do

tempo, é suficiente utilizar este intervalo de tempo pré-definido e, juntamente com as variações de tensão observadas, calcular a corrente conforme a fórmula mencionada. Em seguida, esses dados são processados por meio de uma regressão polinomial de oitava ordem, a fim de mitigar os efeitos de flutuações de tensão. Uma comparação entre este método e o osciloscópio, conhecido por sua precisão, é apresentada na Figura 5.

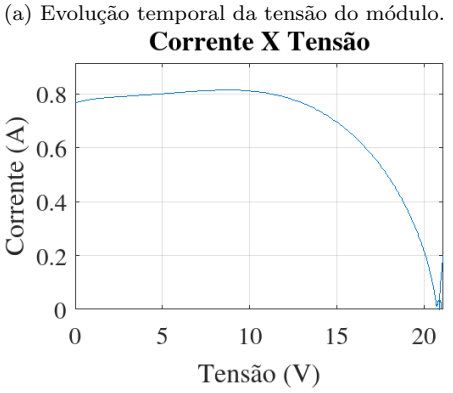
4. RESULTADOS

Para os testes do sistema, foi utilizado o SSA10W-12 da Star Solar (Voc= 22.7 V, e Isc= 0.6 A). O módulo é montado com 4 células em série. Com o objetivo de simular anomalias, algumas células foram sombreadas para os experimentos, interrompendo o fluxo de corrente e possibilitando a análise da produção de energia do sistema.

Fatores externos, como temperatura, inclinação e radiação solar, exercem forte influência sobre o desempenho do módulo fotovoltaico. Todos os testes foram realizados no horário de pico de produção de energia, das 12:00 às 14:00 horas, mantendo a mesma inclinação do módulo e níveis aproximadamente constantes de radiação solar. Foi escolhido um dia com céu completamente livre de nuvens para garantir a maior qualidade nos testes.



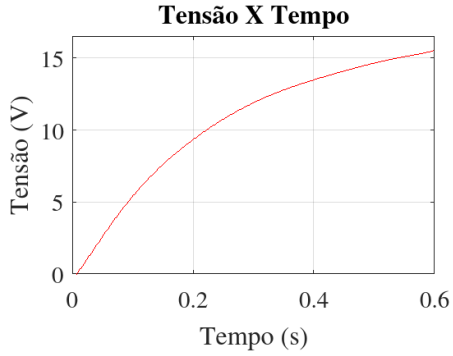
(a) Evolução temporal da tensão do módulo.



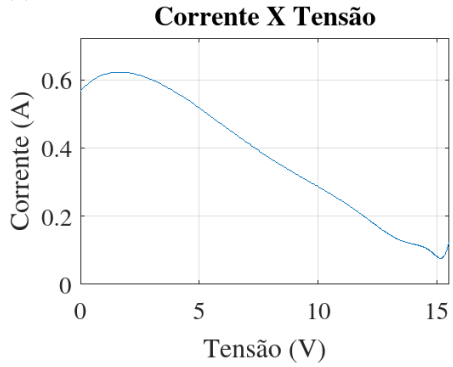
(b) Curva I-V obtida.

Figura 6. Resultados da caracterização sem sombreamento do módulo fotovoltaico.

Todos os valores gerados durante os testes foram armazenados em nuvem como base de comparação para futuros testes e melhorias do protótipo. O primeiro teste foi realizado completamente descoberto, servindo como referência para as próximas medidas. Conforme demonstrado na Figura 6, observa-se a curva de tensão ao longo do tempo, com o módulo atingindo sua tensão máxima

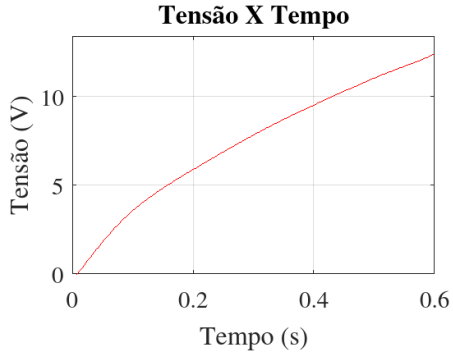


(a) Evolução temporal da tensão do módulo.

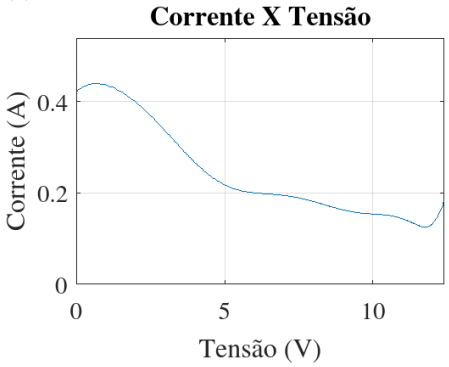


(b) Curva I-V obtida.

Figura 7. Resultados da caracterização com sombreamento mínimo do módulo fotovoltaico.



(a) Evolução temporal da tensão do módulo.



(b) Curva I-V obtida

Figura 8. Resultados da caracterização com sombreamento de 25% da área do módulo fotovoltaico.

conforme especificado pelo fabricante. Além disso, nota-se que a curva de corrente em relação à tensão apresenta um comportamento curvilíneo, exibindo um perfil completo

quanto à geração de energia. Em valores baixos de tensão, a célula opera de forma similar a uma fonte de corrente, enquanto em valores mais elevados, a célula se comporta de maneira semelhante a uma fonte de tensão.

Ao comparar o módulo solar com apenas uma célula coberta (Figura 7), observa-se um decréscimo na tensão do sistema de cerca de 24,5%. Além de uma queda mais pronunciada no gráfico de corrente em relação à tensão, resultando em quase uma linha reta após atingir 5 V. O mesmo padrão é observado quando a última célula da fileira é sombreada, reduzindo a área útil para produção de energia para 75% da área total do módulo (Figura 8). Por outro lado, observa-se um achatamento da curva de tensão ao longo do tempo. É importante notar que o intervalo entre 0 V e 5 V apresenta o maior declínio em todo o gráfico de corrente em relação à tensão.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um protótipo em desenvolvimento de um caracterizador de módulos fotovoltaicos, utilizando uma plataforma WEB para o tratamento e processamento dos dados coletados. O experimento é conduzido em um sistema de baixa potência, onde o módulo fotovoltaico utilizado possui uma tensão de circuito aberto máxima de 23,5 V e corrente de curto-circuito menor que 1 A. Mesmo nessas condições, o sistema operou como esperado, medindo os valores de tensão, através da porta do microcontrolador ESP32 com auxílio de um circuito simples de divisor de tensão, quanto nos valores de corrente calculados a partir da medição de tensão.

Além disso, ao empregar a própria fórmula de corrente do capacitor para determinar o sinal de corrente durante a fase de carga, o sistema se torna ainda mais simplificado, em termos de hardware eliminando a necessidade de um circuito adicional no projeto.

Percebe-se também que, por se tratar de uma plataforma WEB, não há necessidade de o usuário baixar nenhum programa, uma vez que as atualizações ocorrem de forma completamente instantânea, permitindo assim aos usuários que estejam em campo não esperar pela instalação de uma atualização.

REFERÊNCIAS

Alam, M.S., Islam, M.I., and Mansur, A.A. (2024). Comprehensive investigation of performance degradation of old photovoltaic panels at outdoor exposed condition: A case study in bangladesh. In *2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, 945–950. doi: 10.1109/ICEEICT62016.2024.10534386.

Basoglu, M.E. and Çakir, B. (2015). Investigation of solar panel characteristics and mppt performance under partial shading conditions. In *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1043–1047. doi:10.1109/ELECO.2015.7394633.

Beaufort, F. (2015). Como se comunicar com dispositivos bluetooth por javascript. https://developer.chrome.com/docs/capabilities/bluetooth?hl=pt-br. Accessed: 2024-05-05.

Belik, M. and Nohacova, L. (2020). Particular silicon type photovoltaic cells prolonged degradation. In *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 1–6. doi:10.1109/EPE51172.2020.9269235.

Brito, E.M.d.S., Antônio, A.d.S., Cupertino, A.F., and Pereira, H.A. (2014). Characterization of solar panel using capacitive load. In *2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, 1–7. doi: 10.1109/INDUSCON.2014.7059472.

Cavalcante Junior, V.M., Fernandes, T.A., Cavalcanti Neto, R., Barbosa, E.J., Bradaschia, F., and Cavalcanti, M.C. (2024). Avaliação estática e dinâmica de fontes emuladoras solares comerciais e seus impactos em estudos de mppt. *Eletrônica de Potência*, 29, e202403.

Infineon-IR2104 (2024). Ir2104 datasheet- international rectifier. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-v01$_0$0 $-$ $EN.pdf?fileId$ $=$ $5546d462533600a4015355c7c1c31671$.

Kozsely, G., Bodnár, I., Matusz-Kalász, D., and Lipták, R. (2022). Determination of solar panel's characteristics by flash testing. In *2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 233–238. doi:10.1109/ICCC54292.2022.9805876.

Lee, S., An, K.E., Jeon, B.D., Cho, K.Y., Lee, S.J., and Seo, D. (2018). Detecting faulty solar panels based on thermal image processing. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 1–2. doi: 10.1109/ICCE.2018.8326228.

Livera, A., Theristis, M., Makrides, G., and Georghiou, G.E. (2019). Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems. volume 133, 126–143.

Ministério de Minas e Energia (2023). Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023. https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023. Accessed: 2024-05-05.

Padmavathi, N. and Chilambuchelvan, A. (2017). Fault detection and identification of solar panels using bluetooth. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, 3420–3426. doi:10.1109/ICECDS.2017.8390096.

Pereira, T.A., Schmitz, L., dos Santos, W.M., Martins, D.C., and Coelho, R.F. (2021). Design of a portable photovoltaic i–v curve tracer based on the dc–dc converter method. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(2), 552–560. doi:10.1109/JPHOTOV.2021.3049903.

Simatupang, D., Biswas, K., Sifat, I., Agrios, A., Ayers, J., and Park, S.Y. (2023). Photovoltaic characterization based on light intensity modulation impedance spectroscopy. In *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 6521–6523. doi:10.1109/ECCE53617.2023.10362296.

Zheng, H., Li, S., and Proano, J. (2012). Pv energy extraction characteristic study under shading conditions for different converter configurations. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–8. doi:10.1109/PESGM.2012.6343970.