

Sistema autônomo traçador de curvas I-V

Autonomous I-V curve tracer system

Albert Kirchner¹, Sérgio Henrique Maciel dos Santos², Douglas José Coutinho³

RESUMO

A energia solar é crucial na busca por fontes renováveis e limpas de energia. Apesar dos altos custos e da diminuição da eficiência dos painéis fotovoltaicos ao longo do tempo, é essencial diversificar a matriz energética. Tecnologias como os Fotovoltaicos Orgânicos (OPVs) têm surgido como inovações promissoras, mas ainda estão em fase inicial de pesquisa e requerem testes. Este trabalho apresenta um dispositivo de baixo custo para rastreamento de curvas I-V, essenciais para extrair parâmetros elétricos de células solares, como a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e o fator de preenchimento (FF). Além disso, o dispositivo monitora a umidade, temperatura e intensidade de luz (I_0) em protótipos de painéis solares de baixa potência. Utilizando um microcontrolador ESP32 e transmissão via WiFi para uma planilha na nuvem, os dados são exibidos em uma página da web para monitoramento em tempo real. Versátil, o dispositivo aplica tensões de -2,5 a 2,5 V com resolução ajustável e mede correntes tão baixas quanto 1 nA. Sua portabilidade o torna adequado para uso em laboratórios e ambientes externos, atendendo a diversas necessidades na pesquisa de tecnologia fotovoltaica.

PALAVRAS-CHAVE: monitoramento fotovoltaico; sistemas embarcados; traçador I-V.

ABSTRACT

Solar energy is crucial in the pursuit of renewable and clean energy sources. Despite the high costs and the decrease in efficiency of photovoltaic panels over time, it is essential to diversify the energy matrix. Technologies like Organic Photovoltaics (OPVs) have emerged as promising innovations but are still in the early research phase and require testing. This work introduces a low-cost device for I-V curve tracking, essential for extracting electrical parameters from solar cells, such as short-circuit current (I_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), and fill factor (FF). Additionally, the device monitors humidity, temperature, and light intensity (I_0) in low-power solar panel prototypes. Using an ESP32 microcontroller and WiFi transmission to a cloud spreadsheet, the data is displayed on a web page for real-time monitoring. Versatile, the device applies voltages from -2.5 to 2.5 V with adjustable resolution and measures currents as low as 1 nA. Its portability makes it suitable for use in laboratories and outdoor environments, meeting various needs in photovoltaic technology research.

KEYWORDS: photovoltaic monitoring; embedded system; I-V tracer.

1. INTRODUÇÃO

O interesse crescente por energia renovável impulsiona a adoção da energia solar, gerando a necessidade de explorar novas tecnologias para otimizar células solares. As *Source Measurement Units* (SMUs) desempenham um papel crucial, aplicando tensão controlada e medindo corrente para extrair informações, como as curvas I-V (corrente-tensão) com dados como tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto-circuito (I_{sc}). Embora tenham surgido opções de baixo custo para traçar essas curvas em dispositivos solares, muitos são projetados para aplicações de watts e quilowatts, não atendendo às necessidades de laboratórios que requerem análises precisas.

¹Bolsista do CNPq. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil. E-mail: akirchner@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8127035732842767.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil. E-mail: sergiohenriquemaciel@outlook.com. ID Lattes: 1131838890798594

³Docente no Curso de Engenharia de Computação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil. E-mail: douglascoutinho@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1916064207740861.



Nesse contexto, surge a oportunidade de desenvolver um equipamento personalizado para coletar informações robustas e confiáveis em estudos de células solares. Um dispositivo adaptado às especificidades laboratoriais pode impulsionar avanços na compreensão e otimização do desempenho das células solares, contribuindo para o progresso contínuo das tecnologias de energia renovável.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

2.1.1 ESP32

O ESP32 é um poderoso microcontrolador de baixo custo que se destaca por sua versatilidade e capacidade de conectividade. Equipado com um processador dual-core, WiFi e Bluetooth integrados, e uma ampla variedade de periféricos, o ESP32 é amplamente utilizado em projetos de IoT (Internet das Coisas). Sua comunidade ativa de desenvolvedores e o suporte a diversas linguagens de programação tornam-no uma escolha popular para a criação de dispositivos inteligentes e soluções de conectividade sem fio, capacitando uma gama diversificada de aplicações, desde sensores ambientais até sistemas de controle remoto e dispositivos de monitoramento.

2.1.2 ADS1256

O ADS1256 é um conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits de 8 canais simples ou 4 canais diferenciais. Possui resolução de 0,298 μ V e baixo ruído, garantindo qualidade na medida dos sinais elétricos para aplicações de alta fidelidade.

2.1.3 GOOGLE APPS SCRIPT

O Google Apps Script é uma plataforma de automação e extensão de funcionalidades integrada aos produtos do Google Workspace, como o Planilhas Google, Documentos Google e Formulários Google. Com essa linguagem de script baseada em JavaScript, os usuários podem criar scripts personalizados para automatizar tarefas repetitivas, melhorar a eficiência dos fluxos de trabalho e estender a funcionalidade das ferramentas do Google.

2.2 MÉTODOS

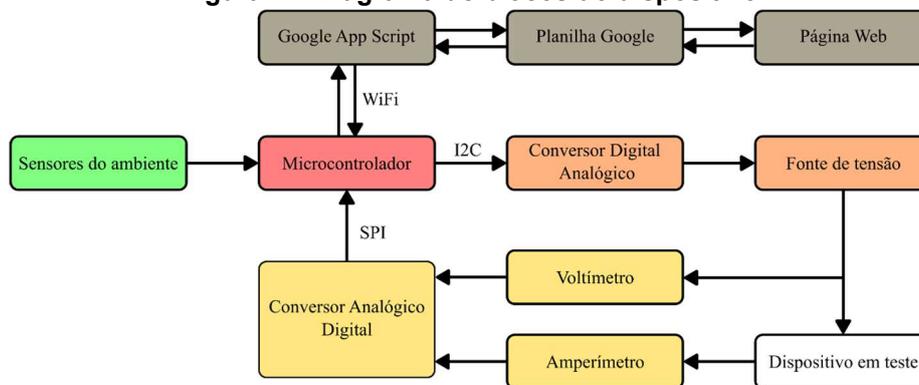
A elaboração do sistema baseou-se na aplicação de uma rampa de tensão, leitura da corrente gerada pelo dispositivo em teste, armazenamento dos dados em nuvem e interface com uma página Web. O equipamento tem a capacidade de realizar leitura de até sete dispositivos para a mesma configuração. O funcionamento do equipamento pode ser dividido nas seguintes etapas:

- fonte de tensão: circuito desenvolvido para aplicar uma rampa de tensão de -2,5 V a 2,5 V no dispositivo em teste;

- voltímetro: circuito desenvolvido para medida da tensão aplicada no dispositivo em teste;
- amperímetro: circuito desenvolvido para medida de corrente no dispositivo em teste;
- sistemas de relés: controle das resistências shunt do amperímetro e da seleção de dispositivo para teste;
- sensores do ambiente: sensores de temperatura, umidade e irradiância; e
- banco de dados e interface do usuário online: solução desenvolvida para enviar instruções para a rotina de leitura e exibir as medidas elétricas e dados dos sensores através de uma interface em uma página Web.

O sistema pode ser resumido no diagrama de blocos presente na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de blocos do dispositivo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2.2.1 FONTE DE TENSÃO

A fonte de tensão foi desenvolvida para aplicar uma tensão com 5 V de amplitude com -2,5 V de offset, permitindo uma varredura de -2,5 V até 2,5 V. O *Digital-to-Analog Converter* (DAC) de 12 bits, MCP4725, recebe comandos do microcontrolador ESP32 através de comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C), fornecendo tensão com amplitude de 0 a 5 V com resolução de até 1,2 mV. O ajuste da amplitude e offset é feito a partir de dois potenciômetros de 100 kΩ junto ao amplificador operacional CA3140. Na saída do amplificador operacional é contemplado ainda um amplificador de potência através de uma configuração *push-pull* com transistores bipolares de junção (TBJ), evitando discontinuidades quando gerada rampa de tensão que excursiona entre tensões negativas e positivas.

2.2.2 VOLTÍMETRO

Com fim de garantir que a tensão seja aplicada com precisão no dispositivo em teste, foi desenvolvido o voltímetro. Tendo em vista que o ADC pode medir apenas tensões positivas, se faz necessário um circuito auxiliar para tratar o sinal, para isso foi utilizado o amplificador operacional TL082 e um potenciômetro de 10 kΩ que eliminam o offset de 2,5 V adicionado na etapa da fonte de tensão. Para ajuste da amplitude foi adicionado mais um potenciômetro de 10 kΩ, fazendo possível a leitura de uma tensão entre 0 a 5 V. Após o tratamento do sinal analógico, ocorre a conversão através do ADS1256 e então os dados

são enviados para o microcontrolador através da comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI).

2.2.3 AMPERÍMETRO

O amperímetro opera no princípio de medida de corrente de maneira indireta, a mesma corrente elétrica que passa pelo dispositivo em teste é a mesma que passa pela resistência em série, este método é conhecido como medida a partir de um resistor *shunt*, segundo Camargo este método é geralmente lembrado para medida de correntes de grande amplitude, porém pode ser adaptado de maneira prática para valores menores de corrente. Através da medida precisa da queda de tensão sobre a resistência e sabendo o valor da resistência, a corrente elétrica pode ser calculada pela lei de Ohm. Para prover uma faixa de medida de corrente de nano amperes a miliamperes foram adotadas sete escalas de resistência controladas por um sistema de relé automático. Sendo as escalas: 0,1 Ω , 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω , e 100 k Ω .

O circuito do amperímetro é baseado em dois amplificadores operacionais LMC662, que possui uma corrente de bias de 2 fA, tal parâmetro é de interesse pois, segundo Jung, a corrente de bias pode adicionar tensões de erro no circuito, prejudicando a medida. O primeiro amplificador irá adicionar um offset de 2,5 V (necessário para a leitura de correntes negativas) e amplificar o sinal em 10 vezes, o segundo amplificador terá um ganho de 10 vezes.

Conforme há o aumento da corrente, ocorre a troca de resistor para uma resistência menor. Essa troca ocorre quando o a tensão do ADC satura através de um sistema de relés que será apresentado posteriormente.

2.2.4 SISTEMAS DE RELÉS

Foram desenvolvidos dois sistemas de relés: um para a seleção da resistência do amperímetro e o outro para seleção do dispositivo em teste.

O sistema do amperímetro foi desenvolvido com seis relés que são controlados por um registrador de deslocamento com saída de 8 bits. A troca de escala ocorre a partir de um código de 8 bits enviado pelo ESP32 ao registrador de deslocamento, esse código irá refletir nas saídas dos registradores, acionando os relés apropriados.

O sistema de relés desenvolvido para seleção do dispositivo é composto por oito relés, os componentes utilizados são os mesmos do sistema de relés do amperímetro. O registrador de deslocamento recebe um valor em binário, fechando o contato de um relé de cada vez para realizar a medida. Portanto, a partir deste sistema de relés é possível a medida autônoma de oito dispositivos diferentes sem a necessidade de trocas manuais de dispositivos.

2.2.5 SENSORES

Para leitura de temperatura e umidade foi utilizado o módulo DHT22, tal dispositivo oferece uma faixa de leitura de temperatura de -40°C a 80°C com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Para a leitura de umidade o DHT22 abrange um faixa de 0% a 100% de umidade com precisão entre $\pm 2-5\%$.



Para medida de irradiância foi adotado um fotodiodo BPW34 com área ativa de $7,5\text{mm}^2$. O fotodiodo ocupa uma das posições disponíveis para teste de dispositivos, a medida de irradiância ocorre ao polarizar o BPW34 reversamente com $-2,5\text{ V}$ e a foto corrente (I_{ph}) resultante é registrada. A partir da foto corrente é possível calcular a intensidade luminosa.

2.2.6 BANCO DE DADOS E INTERFACE ONLINE

A partir da plataforma Google Apps Script foi possível personalizar o aplicativo Planilhas Google. Foram desenvolvidos *Scripts* para envio e recebimento de dados entre ESP32 e uma Planilha Google. A planilha foi programada para extrair as variáveis de interesse: corrente e tensão de máxima potência, tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (J_{sc}) e fator de preenchimento (FF).

Além do Google Apps Script integrado com a planilha, há também a integração com um formulário Google que é presente na página Web. Através do formulário são enviadas as informações para a rotina de leitura do equipamento: horário da medida, degrau de tensão, tensão inicial, tensão final, tempo entre medida de cada ponto de tensão e seleção dos dispositivos para teste.

A página Web desenvolvida funciona como interface do usuário para configuração de varredura de medidas e exibição dos resultados. Foram empregadas as linguagens de programação HTML e CSS para o design e funcionamento da página, a exibição de dados ocorre a partir da incorporação de gráficos presentes na planilha Google e da mesma maneira é incorporado o formulário para envio dos dados de leitura.

A página é dividida em três telas: exibição dos valores de eficiência, temperatura, umidade, potência máxima, fator de preenchimento, tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito correspondentes à última medição de cada uma das sete posições de dispositivos; exibição da última curva I-V de cada uma das sete posições de dispositivos e configuração dos parâmetros de medida.

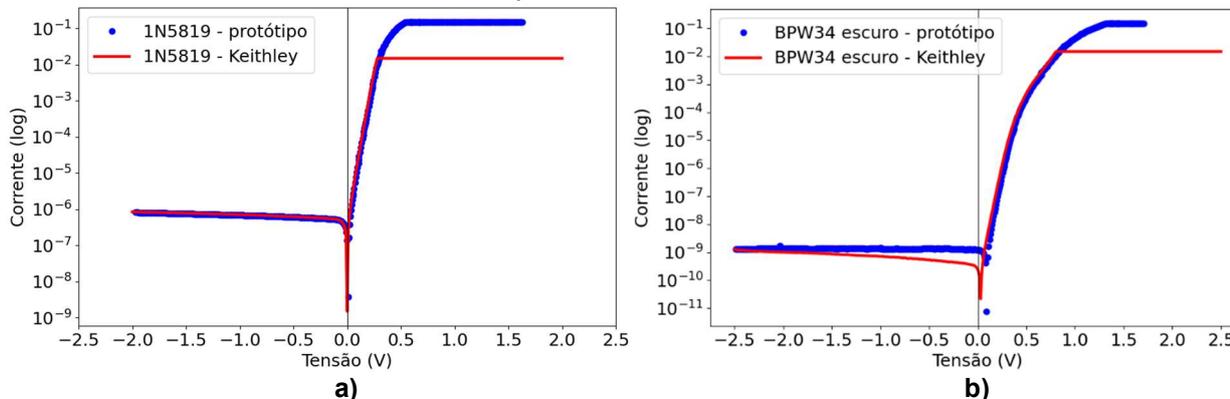
3. RESULTADOS

Após concebido o dispositivo, foi possível realizar medidas de testes e também realizar comparações com o SMU Keithley 2614B. Foram feitas medidas de -2 V a 2 V em um diodo 1N5819 (Figura 2a) e de $-2,5\text{ V}$ a 2 V no fotodiodo BPW34 no escuro (Figura 2b). Nota-se a diferença na saturação por conta da configuração de saturação do Keithley.

É notável a semelhança entre as medidas realizadas pelo protótipo e o Keithley, é possível ainda ressaltar a leitura da foto corrente do BPW34 no escuro, chegando a 1 nA , conforme visto na Figura 2b.



Figura 2 – Comparação entre medidas realizadas pelo protótipo e pelo Keithley 2614B. a) curvas medidas com o diodo 1N5819. b) curvas medidas com o fotodiodo BPW34 no escuro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4. CONCLUSÃO

Com base nas informações apresentadas neste relatório, fica evidente a significativa relevância do protótipo desenvolvido, destacando-se sua notável capacidade de medição de corrente, que se assemelha ao desempenho do SMU Keithley 2614B, avaliado em aproximadamente US\$ 13.000,00, enquanto que o protótipo teve um custo de aproximadamente R\$1.000,00. Além disso, ressalta-se a versatilidade do protótipo, apto a ser aplicado em diversas áreas que requerem medições de corrente, abrangendo desde a escala nano até mA. Em futuros trabalhos, almeja-se a expansão do dispositivo para um SMU de dois canais, com a possibilidade de utilização como potenciostato, ampliando ainda mais suas capacidades e aplicações.

Agradecimentos

Agradeço ao orientador Dr. Douglas José Coutinho pela confiança e entusiasmo no projeto.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste projeto.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

Camargo, Alexandre Menezes de. Desenvolvimento de resistor shunt para medidas de correntes impulsivas em especial para aquelas oriundas de descargas atmosféricas. Diss. Universidade de São Paulo, 2003.

JUNG, Walt G. Op Amp Applications Handbook. Illustrated edition. ed. [S. l.]: Newnes, 2004. 896 p. ISBN 9780750678445