

Traçador de curva $I-V$ para célula fotovoltaica de Perovskita com pequena área.

Robson Mayer (CTI) rmayer@cti.gov.br

Resumo

Este trabalho apresenta um sistema e método de caracterização de célula solar de Perovskita PSC (Perovskite Solar Cell) em dispositivos de pequena área, com aproximadamente $3,18\text{mm}^2$ para avaliação do desempenho da composição dos diferentes materiais do substrato. A medição da curva corrente-tensão ($I-V$) é um método amplamente utilizado para estimar a eficiência de conversão de energia de uma célula solar, assim como o rastreamento da sua máxima potência. Substratos combinados com Perovskita apresentam algumas peculiaridades quanto a sua caracterização como o efeito capacitivo na junção induzida pela velocidade de varredura da tensão e efeito de histerese, diferentemente das células de silício convencionais onde este efeito é reduzido. Efeitos capacitivos mais altos e tempos menores de aplicação de tensão durante o teste reduzem o acúmulo de carga e levam a maior corrente (eficiência) e menor índice de histerese. Um modelo equivalente para a PSC é apresentado e um método de medida de baixo custo é discutido a seguir.

Palavras-chave: Célula solar de Perovskita, Rastreamento do ponto de máxima potência, Energia solar.

1. Introdução

Curvas de corrente por tensões ($I-V$) são o principal método de caracterização para avaliar o desempenho das células solares e suas características elétricas. Enquanto pesquisas avançadas em materiais estão focadas na identificar as melhores soluções e composições de materiais com preocupações como estabilidade, longevidade e compensação de temperatura para uma célula individual, engenheiros de aplicação estão interessados em validar a operação de uma grande sistema ou planta fotovoltaica para avaliar seu desempenho. Traçadores de curva $I-V$ comerciais atendem na sua maioria as aplicações de grande escala do mercado, no entanto, para pesquisadores que trabalham com células pequenas em laboratório, os testadores à nível de célula de pequenas áreas, podem não ter tensão e faixa de corrente adequadas, ou podem não acomodar fisicamente mais do que uma única célula. Com tudo, empregasse neste projeto um traçador especializado da fabricante Ossila, que fornece maior flexibilidade e atende aplicação científica para células de baixa potência do tipo PSC e apresenta custo relativamente baixo quando comparado a um instrumento da Keithley, por exemplo.

Como muitas células experimentais são frequentemente fabricadas em grandes quantidades e em dispositivos de pequenas áreas, por exemplo, como múltiplos “pixels” em cada substrato, o sistema pode ser usado para traçar as curvas $I-V$ e $P-V$ (potência por tensão) de até 8 células individuais, o que é uma vantagem para realizar testes comparativos. Também pode ser usado para validar a máxima eficiência da célula e o ponto máximo de potência, assim como a vida útil das células. A SMU (*Source Meter Unit*) é responsável por gerar a varredura de tensão e

medir a corrente resultante. Além disso, a SMU pode ser calibrada para garantir dados precisos e confiáveis em tentes de vida útil e ciclos térmicos.

2. Conceito e sistema de medida

O sistema de medida utilizado neste projeto é um kit de baixo custo do fabricante Ossila, a SMU X200 com a Board Smart PV, mostrada na Fig. 1, para medir a curva I-V [1]. Ao contrário de outros métodos que variam uma resistência ou alteram o ponto de operação de um conversor CC/CC, o medidor funciona varrendo uma tensão (ou corrente) e medindo a corrente (ou tensão) resultante. A Fig. 1 ilustra o simulador solar utilizado, baseado em uma lâmpada de xenon com feixes de luz direcional (tipo *Sky Walker*) por espelhos com a Board, a SMU e o computador com software de medida e análise.



Figura 1 – Configuração do sistema de testes de PSC de pequena área.

Ao lado da SMU, a Board Smart PV é usada para configurar quais das 8 células individuais de perovskita serão testadas, todas com área de $0,0318 \text{ cm}^2$. Elas são montadas sobre uma placa de substrato com área total de 2 cm^2 e encaixada ao suporte de teste da Board. É possível testar mais de uma célula por vez, criando curvas sobrepostas e teste de longa duração como vida útil. O kit é móvel, flexível e acessível quando comparado a outros produtos com as mesmas especificações no mercado.

Um software dedicado da Ossila é utilizado para controlar e configurar a SMU, que comanda a Board Smart PV e gera a tensão para a varredura de corrente, lendo os dados, traçando as curvas I-V, P-V e grava os dados em um banco de dados para análise futura.

O circuito é adequado para células com I_{sc} até $0\sim 200 \text{ mA}$ e V_{oc} até $-10 \text{ V} \sim 10 \text{ V}$, incluindo rastreamento MPPT, varreduras J-V (densidade de corrente por tensão) e operação em tensão ou corrente constantes. O simulador solar produz uma irradiação constante de 1000 W/m^2 com filtro AM 1,5G. Normas IEC 61215 e IEC 61646 estabelecem vários requisitos para a medição precisa de temperatura, tensão, corrente e irradiância em células solares e permite realizar testes

em uma faixa de temperaturas da célula de 25° C a 50° C e níveis de irradiância de 700 W/m² a 1.100 W/m², no entanto a condição padrão é 1000 W/m² em 25° C com massa de ar AM1.5.

3. Célula solar PSC

Por muitas décadas, pesquisas e fabricantes de células fotovoltaicas se concentraram predominantemente em dispositivos feitos de semicondutores cristalinos ou policristalinos de estado sólido altamente estáveis, como o Si e GaAs de junção simples [2]. Na segunda metade da década, surgem as células tandem de múltiplas junções e com elas o material perovskita (óxido de cálcio e titânio, CaTiO₃), que recebeu grande relevância e atenção da comunidade científica devido as suas vantagens sobre outros materiais semicondutores, como alto coeficiente de absorção óptica, baixo custo de fabricação, baixa recombinação cinética e alta mobilidade de elétrons [3]. Diferentes combinações de materiais e camadas, aliado a sua alta eficiência de conversão de energia, torna este material um candidato com grande potência para a composição de células solares tandem do século XXI. Muitos tipos de materiais de perovskita estão disponíveis no mercado e compõem diferentes tipos de camadas e montagem de células solares [4]. A Fig. 2 mostra uma seção transversal geral de uma célula solar perovskita típica.

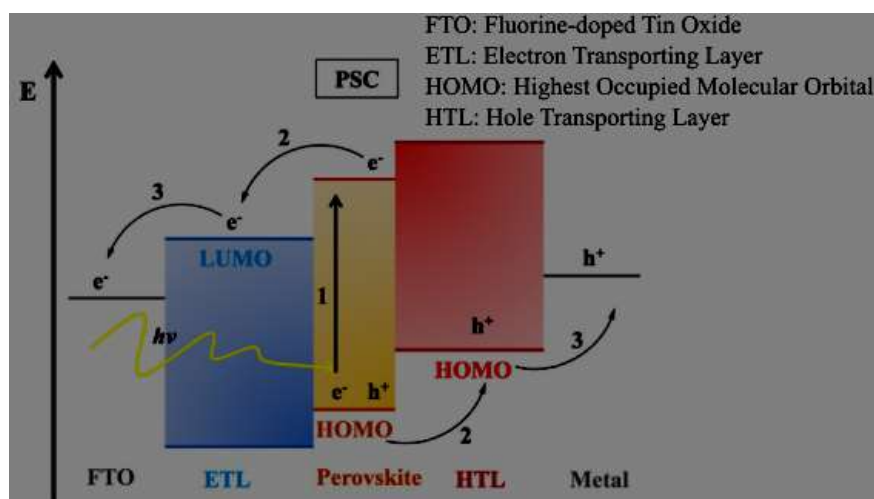


Figura 2 – Princípio de funcionamento da célula solar de perovskita PSC [4].

Estudos em dispositivos e células solares vem mostrando que a eficiência máxima de materiais do tipo PSC já superaram os 29 % em laboratório. Células PSC de boa eficiência apresentam uma densidade de corrente na ordem de 22~35 mA/cm² e apresentam uma capacitância interna comum estimado em 100 mF/cm², muito superior à do silício (~μF/cm²). Além disso, o deslocamento de íons dentro da célula induz uma corrente capacitiva dependente do tempo, que é consequência de uma resposta atrasada dos portadores de carga iônica. Contudo, o modelo matemático desta célula e os procedimentos de medida apresentam algumas peculiaridades abordada abaixo.

4. Modelo e circuito equivalente da PSC

Células solares de perovskita (PSC) apresentam um desafio ainda mais complexo quanto a sua caracterização uma vez que exibem um comportamento I–V histerético dependente da taxa de varredura da tensão, tornando difícil determinar a eficiência do dispositivo apenas a partir de dados da curva I–V. Vem sendo cada vez mais utilizado o método do rastreamento contínuo do ponto de máxima potência (MPPT) da célula, em vez de só a varredura I–V. Utilizando o método MPPT, é possível medir a eficiência estabilizada das células solares de perovskita ao longo do tempo.

A Fig. 3 apresenta a curva característica de uma célula solar de silício monocristalino com o rastreamento da máxima potência. Observa-se que o MPPT ocorre sempre na inclinação da curva I-V, quando a máxima corrente é atingida para uma máxima tensão.

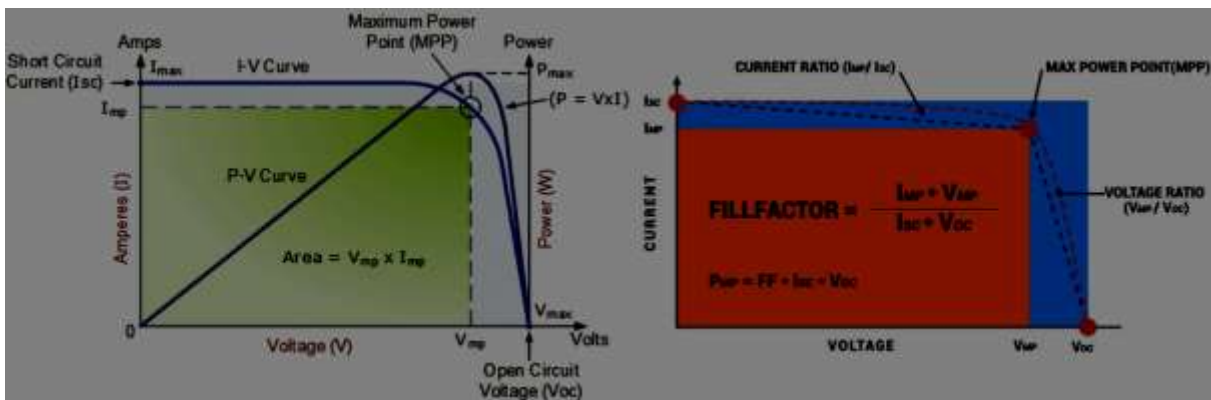


Figura 3 – Curva característica I–V e P–V de uma célula fotovoltaica.

O comportamento da PSC pode ser descrito por um circuito equivalente simples, ilustrado na Fig. 4, no qual um diodo, uma resistência e uma fonte de corrente são conectados em paralelo com um resistor em série na saída. O diodo é derivado da junção *p-n* das camadas da célula, *Rsh* modela uma perda interna na célula e *Rs* sua resistência a mobilidade de elétrons entre seus terminais.

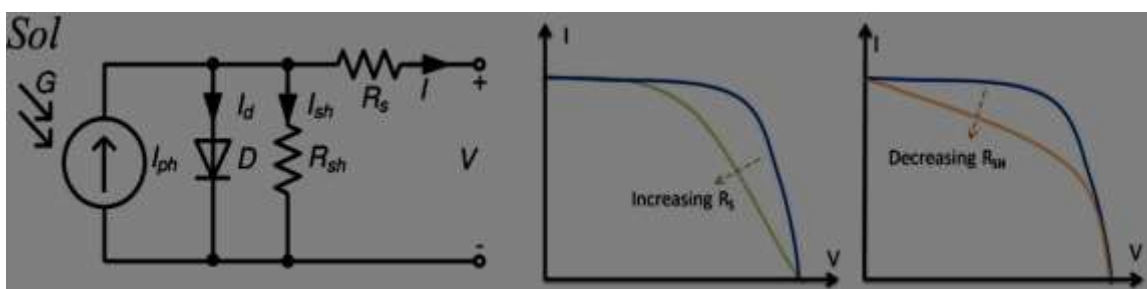


Figura 4 – Circuito equivalente de uma célula solar de perovskita.

A estrutura perovskita é modelada como uma célula solar padrão como mostrado na Fig. 4. No entanto, os parâmetros da célula PSC apresentam algumas diferenças e são dinâmicos por natureza. As equações (1)-(7) denotam o modelo comportamental para a célula fotovoltaica [5].

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

A fotocorrente da célula é representada na equação (2). *G* representa a incidência solar (W/m^2) para espectro AM 1,5G, *Isc* a corrente de curto circuito da célula (A), *Ki* é o coeficiente de

temperatura da corrente (0,0001~0,01 A/K), T é a temperatura de operação (K), T_{ref} é a temperatura de referência (298,15 K) e, G_{ref} é a incidência solar de referência (1000 W/m²).

$$I_{ph} = \frac{G (I_{sc} + K_i [T - T_{ref}])}{G_{ref}} \quad (2)$$

Corrente no diodo intrínseco I_d é estimada na equação (3). I_o é corrente de saturação reversa, q é a carga do elétron, V a tensão de circuito aberto da célula, R_s a resistência série da célula, n é o fator de idealidade e, k é a constante de Boltzmann (1,380649×10⁻²³ J K).

$$I_d = I_o \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] \quad I_o = I_{sc} \left[e^{\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] \quad (3)$$

A corrente de curto-circuito I_{sh} é estimada na equação (4). E_g é o *band gap* do material (eV) e, R_{sh} é a resistência paralela ou *shunt* da célula.

$$I_{sh} = I_o \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{q E_g \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}{n k}} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

Tensão terminal na célula V é estimada na equação (5).

A tensão de circuito aberto V_{oc} da célula fotovoltaica é estimada na equação (6).

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (6)$$

A eficiência de conversão da célula é calculada como a razão entre a potência máxima gerada e a incidente solar irradiada, conforme equação (7).

$$\eta = \frac{P_{max}}{G_{ref}} = \frac{J_{mp} \cdot V_{mp}}{G_{ref}} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{G_{ref}} \quad (7)$$

onde a máxima potência é P_{max} (W), densidade de corrente na máxima potência é J_{mp} (A/m²) a tensão da máxima potência é V_{mp} , a densidade de corrente de curto-circuito é J_{sc} e o fator de forma ou preenchimento é FF . Quanto maior for FF , melhor é a qualidade da célula.

Perdas de energia causadas pela presença de uma resistência *shunt* R_{sh} , são normalmente função de defeitos de fabricação. Uma baixa resistência *shunt* causa perdas de energia nas células solares, fornecendo um caminho de corrente alternativo para a corrente gerada pela luz do sol. O efeito de uma resistência *shunt* é elevado em níveis de baixa iluminação, uma vez que haverá menos corrente gerada pela luz solar [6].

Os valores de I_{ph} , I_o , R_s e R_{sh} dependem do tamanho físico da célula solar construída. Ao comparar células idênticas, uma célula com duas vezes a área de junção de outra terá, em princípio, o dobro de I_{ph} e I_o porque tem o dobro da área onde a fotocorrente é gerada e através da qual a corrente do diodo pode fluir. Pelo mesmo motivo, também terá metade da resistência série R_s relacionada ao fluxo de corrente. No entanto, para células solares de silício de grande área, a escala da resistência em série encontrada pelo fluxo de corrente não é facilmente

previsível, uma vez que dependerá crucialmente do caminho percorrido por eles e dos eletrodos de captação, assim como resistências de contato.

Um aumento da corrente de saturação reversa I_0 produz uma redução da tensão V_{oc} , e isso produz aumentos de temperatura na célula. Fisicamente, a corrente de saturação reversa é uma medida do “vazamento” de portadores através da junção $p-n$ em polarização reversa. Este vazamento é resultado da recombinação do portador nas regiões neutras em ambos os lados da junção da célula.

Um exemplo para uma única célula de silício cristalino é mostrado na Fig. 5 (esquerda), acompanhada da curva de potência por tensão (P-V). Esta curva foi feita no laboratório e calibrada para condições de teste padrão (STC). Os pontos críticos de operação como a corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a tensão e corrente do ponto de máxima potência (V_{mp} , I_{mp}) são prontamente obtidas da curva I-V, bem como o fator de preenchimento (FF) e a eficiência da célula.

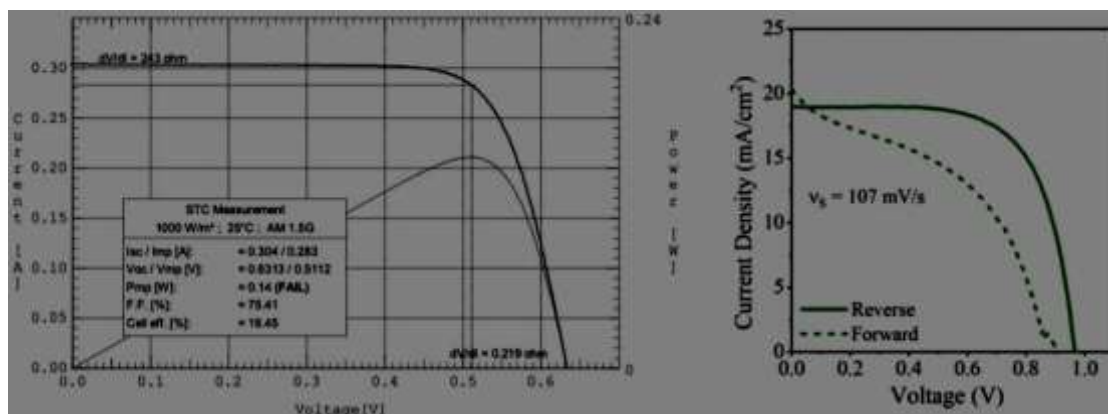


Figura 5 – Curvas I-V e P-V de uma célula de silício de pequena área com 100 mW/cm^2 , AM 1,5G e 25°C (esquerda) e comportamento da histerese de uma PSC (direita).

O efeito da histerese é claramente observado na Fig. 5 (direita), onde a curva da densidade de corrente-tensão (J-V) pontilhada (*Forward*) mostra uma redução notável na tensão V_{oc} e consequentemente do MPPT quando comparado a curva *Reverse*. Este efeito capacitivo é muito comum em células PSC e a taxa de variação da tensão aplicada pelo tempo (V_s) deve ser adequadamente ajustada, uma vez que a máxima eficiência e MPPT da célula podem ser drasticamente diferentes quando a média é realizada pela varredura *Reverse* ou *Forward*.

4. Discussões e considerações finais

Por meio das curvas I-V ou J-V são extraídos os parâmetros mais importantes das células fotovoltaicas e dos módulos, além de ser o método mais comumente usadas para avaliar o desempenho e a sua degradação. Células do tipo PSC, além do método de medida J-V é necessário obter a sua máxima potência e consequentemente sua eficiência para uma melhor avaliação e caracterização com maior precisão. Cuidados na caracterização de PSCs como o efeito capacitivo, estabilidade e degradação ao longo do tempo, em função de ser um dispositivo de pequena área, devem ser observados e bem compreendidos.

Células tandem do tipo PSC vem evoluindo muito nos últimos anos, atingindo eficiências expressivas e demonstrando grande potencial para a sua introdução do mercado de forma massiva. Problemas como a estabilidade a longo prazo, na faixa de 30 anos, devem ser comprovadas e melhor entendidas, uma vez que perovskitas apresentam baixa estabilidade, decorrente de instabilidades na sua composição, em função da temperatura (por exemplo $>80^{\circ}\text{C}$), umidade e luz.

Um método de caracterização a nível laboratórias foi exposto e discutido. O kit adotado apresenta bom custo-benefício e foi desenvolvido para testes em células do tipo PSC, já incorporando suas características de histerese e melhorando a análise dos dados.

Referências

[1] <https://www.ossila.com/>

[2] **Khenkin, M.V., Katz, E.A., Abate, A. et al.** *Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures*. *Nat Energy* 5, 35–49 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0529-5>

[3] **Snaith, H.J.** *Present status and future prospects of perovskite photovoltaics*. *Nature Mater* 17, 372–376 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0071-z>

[4] **Nevena Marinova and Silvia Valero and Juan Luis Delgado.** *Organic and perovskite solar cells: Working principles, materials and interfaces*, *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 488, pp. 373-389, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.021>.

[5] **Yan, K., Dong, B., Xiao, X. et al.** *Memristive property's effects on the I–V characteristics of perovskite solar cells*. *Sci Rep* 7, 6025 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05508-5>

[6] **P. M. Moreno-Romero, D. M. Torres-Herrera, C. A. Rodríguez-Castañeda, A. N. Corpus-Mendoza, J. J. Prias-Barragán and H. Hu,** *Voltage Scanning Speed Determination and Current–Voltage Curves of Different Types of Perovskite Solar Cells*, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 12, no. 2, pp. 611-617, March 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3143459.