

## **DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOR DE CURVA IV PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS<sup>1</sup>**

**Douglas de Souza Lasch<sup>2</sup>, Maurício de Campos<sup>3</sup>, Paulo Sérgio Sausen<sup>3</sup>, Airam Teresa  
Zago Romcy Sausen<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Projeto de pesquisa de dissertação no curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional.

<sup>2</sup> Estudante do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional - UNIJUÍ.

<sup>3</sup> Professor do Programa de pós graduação em Modelagem Matemática e Computacional - UNIJUÍ.

### **RESUMO**

Com o aumento da demanda por fontes renováveis de geração de energia, tem ocorrido um grande crescimento global no uso de geradores fotovoltaicos. No Brasil, as legislações de 2012 e revisadas em 2022 têm impulsionado a geração de energia fotovoltaica, resultando em uma grande quantidade de equipamentos fotovoltaicos em operação. Ao longo do tempo de operação, é necessário realizar avaliações e diagnósticos do desempenho e vida útil dos módulos fotovoltaicos. Para isso, os traçadores de curva IV são equipamentos capazes de avaliar as condições de operação por meio da leitura das principais grandezas elétricas de um módulo fotovoltaico. Além disso, por meio das informações de irradiação solar, temperatura de operação e do modelo matemático, é possível estimar os parâmetros elétricos e a curva de geração de um módulo fotovoltaico. Diante desse contexto, a proposta deste trabalho é apresentar os resultados preliminares referente ao desenvolvimento de um traçador de curva IV. A partir dos dados obtidos com esse equipamento, será possível realizar a avaliação da taxa de degradação e estimar a vida útil de módulos fotovoltaicos. Essa pesquisa visa contribuir para a melhoria da avaliação do desempenho dos módulos fotovoltaicos e sua eficiência, permitindo uma melhor compreensão das condições de operação desses equipamentos e uma estimativa mais precisa de sua vida útil.

**Palavras-chave** Análise de degradação, Geração fotovoltaica, Matlab, Traçador de curva.

### **ABSTRACT**

With the increasing demand for renewable sources of energy generation, there has been a significant global growth in the use of photovoltaic generators. In Brazil, the legislations of 2012 and revised in 2022 have boosted the generation of photovoltaic energy, resulting in a large number of photovoltaic equipment in operation. Throughout the operation time, it is necessary to carry out evaluations and diagnostics of the performance and lifespan of photovoltaic modules. For this purpose, IV curve tracers are equipment capable of evaluating the operating conditions by reading the main electrical parameters of a photovoltaic module. Additionally, through solar irradiation information, operating temperature, and mathematical model, it is possible to estimate the electrical parameters and the generation curve of a photovoltaic module. In this context, the purpose of this dissertation is to present a study for the development of an IV curve tracer and, through the data obtained with this equipment, to evaluate the degradation rate and estimate the lifespan of photovoltaic modules.

**Keywords:** Degradation rate; Photovoltaic generation; IV curve tracer; Photovoltaic cell.

## INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de equipamentos mais eficazes para proteção, monitoramento e também a automação de processos do SEP. O termo Smart Grid (SG), cunhado por Amin e Wollenberg (2005), elencavam as premissas de abordagem para um sistema elétrico inteligente.

Dentre os principais aspectos da SG, está a introdução de fontes de Geração Distribuída (GD), que é a geração instalada junto aos centros de consumo. A GD é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como sendo centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

Um dos principais fatores que contribuíram para o crescimento do uso de GD foi o Protocolo de Kyoto em 1992 (MIYAMOTO; TAKEUCHI, 2019). Com a necessidade de redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa, a comunidade internacional iniciou a sucessão do uso de fontes de energia convencionais por fontes de energia renovável. Diante disto, houve o crescimento no uso de GD a partir de fonte eólica e principalmente a energia solar fotovoltaica. No ano de 2011, a capacidade global de geração eólica era de 238 GW, e a capacidade de geração fotovoltaica era 70 GW. Com o passar dos anos, houve o crescimento mais significativo do uso da tecnologia fotovoltaica, e no ano de 2020, a capacidade global de energia solar fotovoltaica superou a capacidade global de geração de fonte eólica, 760 GW e 743 GW, respectivamente (SHAFIULLAH; AHMED, 2022).

No Brasil, o crescimento do uso de geração distribuída foi impulsionado pela publicação da Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, a qual estabeleceu critérios para o sistema de compensação de créditos de energia elétrica para unidades de micro e mini geração. Diante do crescimento exponencial e da necessidade de revisar a legislação, em 2022 foi publicada a lei número 14.300, a qual instituiu o marco legal da micro geração e da mini geração distribuída, revisando os critérios de remuneração por parte das distribuidoras de energia elétrica, dentre outros fatores importantes para o crescimento do setor de geração de energia distribuída (AGÊNCIA CÂMARA NOTÍCIAS, 2022).

Com isso, diante do aumento do uso de geração distribuída utilizando fonte solar fotovoltaica, há o incremento de módulos fotovoltaicos em operação. Logo, com o passar dos anos haverá o aumento da necessidade de avaliações e diagnósticos dos equipamentos instalados nessas unidades de geração fotovoltaica. Tendo em vista que há um prognóstico de degradação da capacidade de geração nominal dos módulos fotovoltaicos, a avaliação da curva característica dos módulos e a comparação com o modelo matemático podem ser eficazes na determinação da vida útil dos equipamentos em operação. Diante deste cenário, este trabalho apresenta os dados preliminares do desenvolvimento de um traçador de curva IV que será utilizado em conjunto com o modelo matemático para estimar a taxa de degradação de módulos fotovoltaicos.

## **METODOLOGIA**

O presente estudo compreende duas etapas principais. A primeira etapa constitui o desenvolvimento de uma metodologia experimental para coleta dos dados, enquanto que a segunda contempla a elaboração das simulações computacionais no software MATLAB.

Com o intuito de estabelecer a metodologia experimental utilizada na pesquisa definiu-se inicialmente a coleta de dados em módulos fotovoltaicos novos, e também em módulos que já estão em operação e instalados ao tempo sob ação de intempéries, desde que seja possível obter o tempo em que os equipamentos já estejam em operação.

Para realizar a obtenção das curvas características de corrente e tensão dos módulos fotovoltaicos sob análise, será desenvolvido o projeto eletrônico de um sistema de aquisição de dados elétricos e também um sistema de aquisição de dados de irradiação solar e temperatura de operação.

Para o estudo proposto sobre análise de degradação de módulos fotovoltaicos, as etapas de simulação a partir do modelo matemático dos módulos são fundamentais. Uma vez que, a partir dos dados de irradiação e temperatura de operação, o modelo matemático será capaz de estimar a curva característica e o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico sob aquelas condições. Sendo assim, com estes dados do modelo matemático, e os dados reais extraídos pelo equipamento projetado para leitura da curva IV e obtidos experimentalmente, será possível avaliar a atual condição de degradação dos módulos fotovoltaicos, e estimar uma possível vida útil para operação dos equipamentos.

## DEGRADAÇÃO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A degradação em módulos fotovoltaicos refere-se à perda gradual da capacidade de um módulo fotovoltaico gerar eletricidade ao longo do tempo. Existem vários fatores que podem contribuir para a degradação dos módulos fotovoltaicos, incluindo:

- Degradação intrínseca: relacionada com a própria natureza dos materiais utilizados na construção do módulo solar. O envelhecimento natural do silício, principal componente dos painéis solares, é um exemplo disso.
- Condições climáticas: altas temperaturas, umidade e radiação UV excessiva podem contribuir para a degradação do material fotovoltaico.
- Falhas no projeto e fabricação: problemas no projeto ou na fabricação do módulo solar podem contribuir para a degradação mais rápida do painel solar.
- Instalação inadequada: a instalação inadequada dos módulos fotovoltaicos pode levar à degradação mais rápida, pois podem ocorrer danos mecânicos e elétricos durante o processo.

A degradação dos módulos fotovoltaicos é um problema comum em sistemas de energia solar e pode levar à diminuição da eficiência do sistema e da sua vida útil. Para minimizar a degradação, é importante garantir que os módulos fotovoltaicos sejam instalados adequadamente e que as condições ambientais sejam monitoradas e gerenciadas de maneira eficaz.

Os fabricantes de módulos fotovoltaicos apresentam uma taxa de degradação linear estimando um percentual de rendimento em um determinado tempo de operação. Porém, essa taxa de degradação apresenta inúmeras variáveis que podem afetar essa taxa de degradação. No trabalho de Kaaya et al. (2021) é apresentada uma revisão acerca de diferentes fontes de incertezas nas taxas de degradação. Foram analisadas três fontes de incertezas: variáveis climáticas, confiabilidade dos módulos fotovoltaicos e modelos de taxa de degradação. Segundo Kaaya et al. (2021), as maiores incertezas na taxa de degradação são relacionadas a estimativa de temperatura do módulo.

Diante da diversidade de condições e variações as quais os módulos fotovoltaicos são impostos, como por exemplo, a variação de temperatura ambiente dependendo do local de instalação no globo terrestre, há uma dificuldade de prever uma taxa de degradação exata para os equipamentos. Desta forma, os fabricantes apresentam uma estimativa de capacidade de geração de acordo com o tempo de garantia que é fornecido ao equipamento.

No trabalho de Fanego et al. (2018), são levantados diversos fatores ambientais que afetam diretamente a degradação do desempenho de módulos fotovoltaicos, e são apresentados mapas com distribuições geográficas, e níveis de risco associados a diferentes parâmetros como a sujidade, variação de temperatura, irradiação UV, dentre outros.

Em Omazic et al. (2019) é apresentada uma revisão sobre a relação entre a degradação de componentes poliméricos em módulos fotovoltaicos de silício cristalino e condições climáticas. Neste trabalho são apresentados exemplos de degradação decorrentes da exposição das células ao oxigênio. A Figura 1 apresenta os efeitos de foto-branqueamento devido a permeação de oxigênio através de trincas.

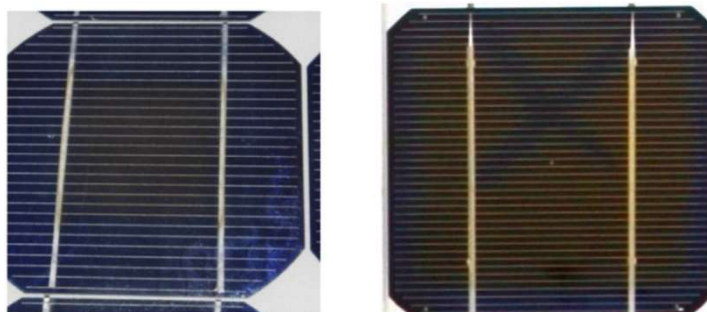


Figura 1 – Foto branqueamento em células fotovoltaicas. Fonte: (OMAZIC et al., 2019).

Portando, a degradação da capacidade de geração dos módulos fotovoltaicos depende de inúmeros fatores associados a questões construtivas e ambientais as quais o equipamento está exposto. Logo, há uma dificuldade em apresentar modelos de degradação que representem fielmente o processo de degradação. A comunidade científica tem trabalhado em modelos matemáticos de regressão para estimar taxas de degradação de forma a auxiliar a determinação da vida útil de módulos fotovoltaicos, porém, tratam-se de sistemas complexos e que dependem de um grande banco dados com informações de todas as variáveis climáticas e físicas associadas ao processo de degradação, e também dependem de um tempo de coleta de dados considerável para possibilitar uma melhor análise dos resultados.

## TRAÇADOR DE CURVA IV

O traçador de curva IV (Corrente-Tensão) é uma ferramenta importante para a análise de desempenho de módulos fotovoltaicos, pois permite obter informações sobre as características elétricas do módulo em diferentes condições de operação.

A curva IV é uma representação gráfica da relação entre a corrente e a tensão do módulo fotovoltaico, e é utilizada para determinar parâmetros importantes, como a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), a corrente máxima de potência ( $I_{mp}$ ), a tensão máxima de potência ( $V_{mp}$ ) e a eficiência do módulo.

Com o traçador de curva IV, é possível medir esses parâmetros em diferentes condições de irradiação e temperatura, o que permite avaliar o desempenho do módulo em condições reais de operação e compará-lo com o desempenho especificado pelo fabricante.

Como os traçadores de curva IV disponíveis comercialmente são equipamentos com um alto custo para aquisição, optou-se pelo desenvolvimento de um traçador de curva IV. Um ponto importante para o desenvolvimento de um traçador de curva IV é a definição de qual tipo de carga utilizar para realizar a circulação da corrente e dissipação da potência elétrica. O trabalho de Zhu et al. (2020), apresentou uma revisão abrangente sobre algumas das topologias mais utilizadas, sendo elas:

- Método de carga resistiva variável;
- Método de carga capacitiva;
- Método de carga eletrônica;
- Método de fonte de alimentação de quatro quadrantes;
- Método do conversor DC–DC.

Analisando as topologias possíveis de utilização no desenvolvimento do traçador de curva IV, optou-se pela utilização do método de carga capacitiva. Nesta topologia, são utilizados capacitores com nível de tensão de isolamento compatíveis com o nível de tensão dos módulos que serão analisados. O valor da capacitância da carga define o tempo da curva de carga juntamente com as características elétricas dos módulos fotovoltaicos, com isso é preciso que o sistema de aquisição das grandezas elétricas tenha uma taxa de amostragem suficiente

para obter os valores de tensão e corrente dentro do tempo da curva de carregamento. A Figura 2 apresenta a característica do comportamento de corrente e tensão quando ligada uma carga capacitiva a um módulo fotovoltaico.

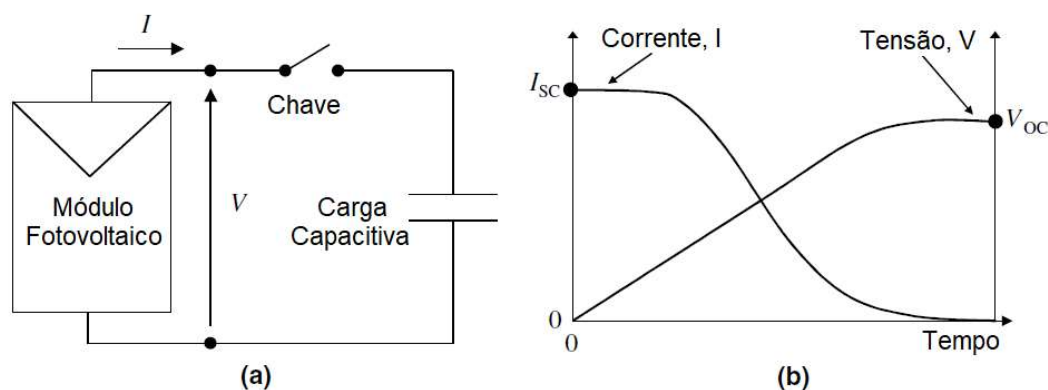


Figura 2 – (a) Carga capacitiva ideal composta por uma chave e um capacitor. (b) Formas de onda de corrente e tensão após fechar a chave em  $t = 0$ . Fonte: Adaptado de (MUÑOZ; LORENZO, 2006).

Nesta topologia com carga capacitiva podem ser utilizados MOSFETS para realizar as manobras de abertura e fechamento do circuito eletrônico. Alguns estudos desenvolveram traçadores de curva com carga capacitiva. Os trabalhos de (CHEN et al., 2018) e (MUÑOZ; LORENZO, 2006) utilizaram carga capacitiva e com topologia de chaveamento similares a topologia apresentada pela Figura 3.

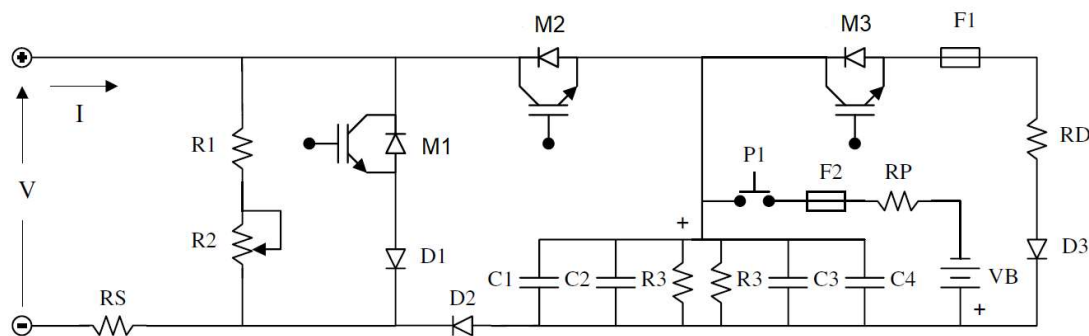


Figura 3 – Topologia do circuito de carga capacitiva. Fonte: Adaptado de (MUÑOZ; LORENZO, 2006).

Nesta topologia da Figura 3 o primeiro MOSFET ( $M1$ ) tem a função de realizar o fechamento do circuito para leitura da corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico ( $I_{sc}$ ). O segundo MOSFET ( $M2$ ), realiza o fechamento do circuito para o carregamento dos

capacitores e leitura da corrente e tensão sobre a carga capacitiva. Por fim, o terceiro MOSFET (M3) realiza a descarga dos capacitores deixando-os preparados para um novo ensaio.

A partir destes dados coletados no ensaio com o traçador de curva IV, é possível obter a curva característica de operação do módulo fotovoltaico sob as condições de irradiação e temperatura no momento do teste. Esses dados são utilizados para avaliar o desempenho do módulo e compará-lo com o desempenho especificado pelo fabricante. Além disso, o traçador de curva IV também pode ser usado para identificar possíveis defeitos ou problemas de desempenho no módulo fotovoltaico, como pontos quentes, falhas de solda ou problemas de contato elétrico.

Portanto, o traçador de curva IV é uma ferramenta fundamental para a análise de desempenho e diagnóstico de problemas em módulos fotovoltaicos, ajudando a garantir a eficiência e confiabilidade desses sistemas de geração de energia.

## **PROTÓTIPO DESENVOLVIDO**

Como etapa de testes iniciais para o desenvolvimento do traçador de curva, foi elaborado um projeto eletrônico de um traçador de curva IV com carga capacitiva. Para facilitar a elaboração do projeto eletrônico, foram definidos os limites de 20 A e 100 V para corrente e tensão respectivamente.

Foram utilizados sensores de tensão de efeito hall para isolar os circuitos de carga e de controle do protótipo, além de um sensor de corrente do tipo janela cujo princípio de funcionamento também é por meio do efeito hall.

Para a unidade de processamento do protótipo foi utilizado um microcontrolador ARM, cortex M3 com frequência de clock de até 72 MHz, o que possibilitou uma taxa de amostragem de leituras de corrente e tensão suficiente para reprodução da curva. A Figura 4 apresenta o resultado final da montagem do protótipo utilizado para os testes iniciais do projeto.

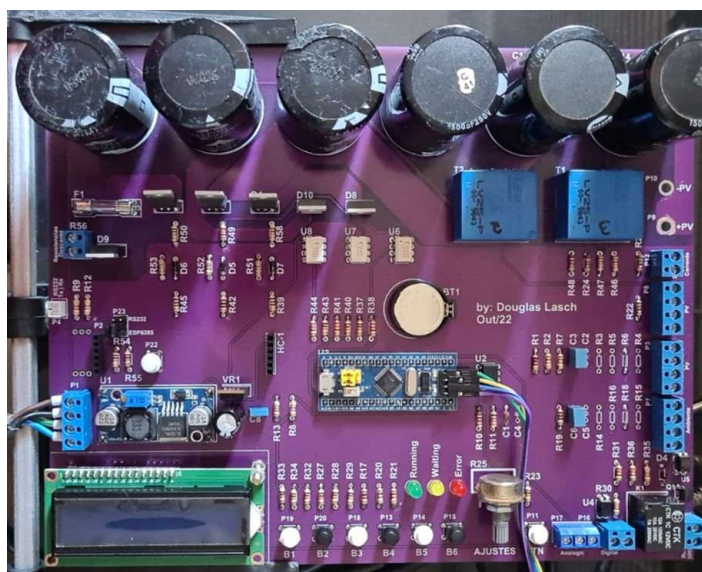


Figura 4 – Placa eletrônica do protótipo. Fonte: Do Autor.

A carga capacitiva foi composta por seis capacitores de  $1.500\ \mu\text{F}$  ligados em paralelo, totalizando uma carga de  $9.000\ \mu\text{F}$ . Com esta carga, com uma taxa de amostragem de  $100\ \mu\text{s}$ , durante o tempo de carregamento de aproximadamente  $150\ \text{ms}$ , foi possível realizar 1500 leituras de corrente e tensão para a composição da curva corrente versus tensão. A Figura 5 apresenta a curva corrente versus tensão extraída de um módulo fotovoltaico da Canadian Solar modelo CS6W-550MS.

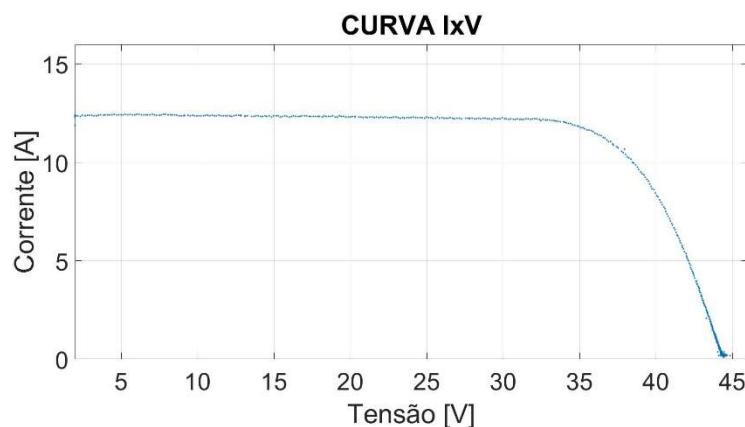


Figura 5 – Curva IV obtida pelo protótipo. Fonte: Do Autor.

O protótipo além de realizar a leitura de corrente e tensão do módulo fotovoltaico, realiza também a aquisição da temperatura de operação através de um sensor de temperatura alocado junto às células durante o ensaio. Além disto, foi projetado o uso de um piranômetro para a leitura da irradiação solar. A próxima etapa do projeto é a calibração da leitura de

temperatura de operação e da irradiação solar, pois com estes valores será possível estimar a curva corrente versus tensão para o módulo no instante do ensaio utilizando a modelagem matemática.

## MODELO MATEMÁTICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para estimar a curva de corrente versus tensão do módulo fotovoltaico sob análise, será utilizado o software MATLAB. A partir dos dados de irradiação solar e temperatura de operação obtidos pelo traçador de curva, o algoritmo elaborado irá estimar através do modelo matemático qual é a potência nominal do módulo. A partir da curva estimada pelo modelo matemático, e a curva de operação extraída pelo traçador, será possível realizar a análise de degradação do referido módulo fotovoltaico.

Para a modelagem matemática foi utilizado o circuito elétrico equivalente, modelo de um diodo. A Figura 6 apresenta o circuito equivalente, onde são apresentados os demais componentes do circuito equivalente, como o diodo, a resistência paralela, e a resistência série.

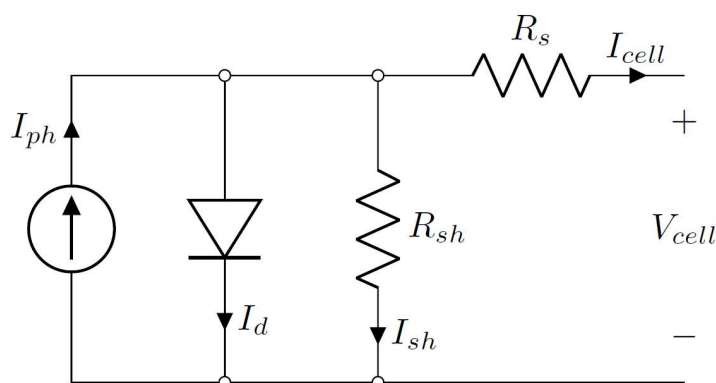


Figura 6 – Circuito equivalente da célula fotovoltaica (modelo de um diodo). Fonte: Do Autor.

Aplicando a Lei dos Nós de Kirchhoff no circuito equivalente apresentado na Figura 6, obtemos a expressão que corresponde a corrente de saída da célula:

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

A fotocorrente  $I_{ph}$  [A] depende diretamente do nível de irradiação solar  $G_a$  [W/m<sup>2</sup>], e também da temperatura ambiente  $T_a$  [°K], e pode ser expressa por Eq. 2. A proporcionalidade da fotocorrente com a irradiação é apresentada na equação Eq. 3.

$$I_{ph} = I_0 + K_0(T_c - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{G_a I_{sc}}{G_{ref}} \quad (3)$$

Na Eq. 3,  $G_{ref}$  tem valor definido de 1000 [W/m<sup>2</sup>] e corresponde à referência da irradiação solar e  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito obtida no catálogo dos fabricantes. Já na Eq. 2  $T_{ref}$  é a referência de temperatura ambiente,  $K_0$  corresponde ao coeficiente de temperatura da corrente de curto circuito e  $T_c$  é a temperatura de operação da célula.

$$T_c = T_a + G_a \frac{NOCT - 20^\circ C}{800 W/m^2} \quad (4)$$

A temperatura real de operação da célula é corrigida pela Eq. 4 e leva em conta a temperatura ambiente  $T_a$ , a irradiação solar incidente na célula  $G_a$ , além do parâmetro NOCT (*Normal Operating Cell Temperature*) que é fornecido pelo fabricante do painel e varia geralmente entre 45 °C e 49 °C. NOCT é definido como a temperatura da célula quando a temperatura ambiente for 20 °C, a irradiação solar for de 0,8 kW/m<sup>2</sup> e a velocidade do vento for igual a 1 m/s.

A corrente no diodo é definida na Eq. 5:

$$I_d = I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q}{n.k.T_c} (V_{cel} + R_s I_{cel}) \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Sendo:

$$I_{sat} = I_{or} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left[ -\frac{q.E_g}{n.k} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (6)$$

E:

$$I_{or} = \frac{I_{sc}}{\left[ \exp \left( \frac{q.V_{oc}}{n.k.T_{ref}} \right) - 1 \right]} \quad (7)$$

Onde:

- $I_{sat}$  – corrente de saturação do diodo [A];

- $q$  – carga do elétron:  $1,6 \times 10^{-19}$  [C];
- $n$  – fator de idealização: 1,525;
- $k$  – constante de Boltzmann:  $1,38 \times 10^{-23}$  [J/K];
- $V_{cel}$  – tensão da célula [V];
- $R_s$  – resistência série [ $\Omega$ ];
- $I_{or}$  – corrente de saturação do diodo em  $T_r$  [A];
- $E_g$  – gap energy: 1,11[eV]; e
- $V_{oc}$  – tensão de circuito aberto por célula [V].

A corrente paralelo  $I_{sh}$  [A] é definida por:

$$I_{sh} = \frac{V_{cel} + R_s I_{cel}}{R_{sh}} \quad (8)$$

A contribuição da corrente de curto circuito no modelo matemático apresenta um valor muito baixo de variação, desta forma a contribuição desta corrente foi desprezada no modelo.

A resistência série pode ser calculada por:

$$R_s = -\frac{\delta V_{cel}}{\delta I_{voc}} - \frac{1}{X_{vcel}} \quad (9)$$

Em que:

$$X_{vcel} = \frac{I_0 \cdot q}{n \cdot k \cdot T_{ref}} \exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot k \cdot T_{ref}}\right) \quad (10)$$

Mais detalhes sobre o modelo matemático são encontrados na bibliografia de (WALKER, 2001).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os primeiros ensaios em módulos fotovoltaicos utilizando o protótipo do traçador de curva IV apresentaram um desempenho satisfatório. Os resultados preliminares buscaram obter uma taxa de amostragem de valores de corrente e tensão que fossem capazes de caracterizar a curva do módulo sob ensaio. Dentro dos limites estabelecidos de tensão e corrente para o protótipo, a taxa de amostragem foi capaz de caracterizar a curva com 1500 leituras.

Antes da possibilidade de avaliar a degradação do módulo fotovoltaico, o projeto precisa passar por duas fases importantes que são: a calibração dos sensores de temperatura e irradiação solar, e por fim, a conclusão do processo de estimativa da curva IV através da modelagem matemática.

O estudo proposto também poderá ajudar a aprimorar o processo de manutenção dos módulos fotovoltaicos, reduzindo os custos operacionais e aumentando a eficiência do sistema como um todo. Por fim, a pesquisa tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo, promovendo a transição para uma matriz energética mais sustentável e renovável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA CÂMARA NOTÍCIAS. **Lei institui marco legal da micro e minigeração de energia - Notícias - Portal da Câmara dos Deputados**. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/843782-LEI-INSTITUI-MARCO-LEGAL-DA-MICRO-E-MINIGERACAO-DE-ENERGIA>>. Acesso em: 19 jul. 2023.

AMIN, M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a Smart Grid. **IEEE power & energy magazine**, n. october, p. 34–41, 2005.

CHEN, Z. et al. **A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic arrays**. Energy Procedia. **Anais...**Elsevier Ltd, 2018.

FANEGO, V. L. et al. Geographical Distribution of Factors Accelerating Performance Degradation of PV Modules. **2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)**, 2018.

KAAYA, I. et al. Assessment of uncertainties and variations in PV modules degradation rates and lifetime predictions using physical models. **Solar Energy**, v. 218, p. 354–367, 1 abr. 2021.

MIYAMOTO, M.; TAKEUCHI, K. Climate agreement and technology diffusion: Impact of the Kyoto Protocol on international patent applications for renewable energy technologies. **Energy Policy**, v. 129, n. May 2018, p. 1331–1338, 2019.

MUÑOZ, J.; LORENZO, E. Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. **Solar Energy**, v. 80, n. 11, p. 1489–1497, nov. 2006.

OMAZIC, A. et al. Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 192, p. 123–133, 1 abr. 2019.

SHAFIULLAH, M.; AHMED, S. Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems : A Review. **IEEE Access**, v. 10, p. 52233–52257, 2022.

WALKER, G. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV Model. **Journal of electrical and electronics engineering**, 2001.

ZHU, Y.; XIAO, W. **A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer**. **Solar Energy** Elsevier Ltd, , 15 jan. 2020.