

ESTUDO E APLICAÇÃO DE MODELO COM DOIS DIODOS EM UM MÓDULO FOTOVOLTAICO PARA COMPARAÇÃO ENTRE DADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

FLÁVIO C. T. MAIA*, CARLOS A. V. CARDOSO*

**Universidade Federal de Sergipe
Departamento de Engenharia Elétrica
São Cristóvão, Sergipe, Brasil*

Emails: flaviocm@yahoo.com.br, carlosvcardoso@gmail.com

Abstract— The installation of electric power generation systems through photovoltaic modules has been growing in the last decades due to the great worldwide appeal for the preservation of the environment. These systems are clean and do not degrade the environment because they do not produce pollutants, they use modules constructed from semiconductor materials, such as silicon, whose photovoltaic cells can be modeled as diodes. To maximize the potential of photovoltaic modules, monitoring systems are important because they allow the comparison between data collected from the real system and predicted values, allowing the detection of possible problems. Thus, predictive systems need a precise mathematical modeling, which means a system of high reliability. This work aims at the study and application of an electric circuit model with two diodes, using parameters and experimental data of a photovoltaic module, and, from the results, find the parameters for the model that represent the module in the most accurate way.

Keywords— renewable energy, photovoltaic systems, two diodes model, Standard Test Conditions, I-V curve

Resumo— A instalação de sistemas de geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos vem crescendo nas últimas décadas devido ao grande apelo mundial pela preservação do meio ambiente. Estes sistemas são limpos e não degradam o meio ambiente pois não produzem poluentes, utilizam módulos construídos a partir de materiais semicondutores, como o silício, cujas células fotovoltaicas podem ser modeladas como diodos. Para o máximo aproveitamento do potencial dos módulos fotovoltaicos sistemas de monitoramento são importantes, pois permitem que dados observados da planta sejam comparados com valores previstos, possibilitando a detecção de possíveis problemas. Para isso, sistemas preditivos necessitam de uma modelagem matemática precisa, o que se traduz em um sistema de alta confiabilidade. Este trabalho visa o estudo e aplicação de um modelo de circuito elétrico com dois diodos, utilizando parâmetros e dados experimentais de um módulo fotovoltaico, e, a partir dos resultados, encontrar os parâmetros para o modelo que representam o módulo da forma mais precisa.

Palavras-chave— energias renováveis, sistemas fotovoltaicos, modelo com dois diodos, Condições Padrão de Testes, curva I-V

1 Introdução

Nas últimas décadas tem-se notado um relevante aumento de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implantação de sistemas de geração de energia elétrica através de fontes renováveis, como eólica, solar, biomassa, etc., em detrimento às fontes que degradam o meio ambiente, como as que fazem uso de carvão mineral, petróleo ou reação nuclear. Isto se deve ao constante apelo mundial pela preservação do meio ambiente, esforço que vem sendo realizado através de acordos, como por exemplo o Acordo de Paris, onde diversos países, inclusive o Brasil, se comprometeram a reduzir os níveis de emissão de gases de efeito estufa (Nascimento, 2017). Uma das fontes renováveis que vem ganhando destaque no cenário mundial é a fonte solar que utiliza módulos fotovoltaicos que convertem a irradiação solar em energia elétrica.

Sistemas fotovoltaicos são compostos de módulos associados de maneira a fornecerem tensões e correntes suficientes para atender a demanda da carga a ser alimentada. Para isso um bom projeto deve ser concebido levando-se em conta todas as variáveis envolvidas, não somente os níveis de irradiação solar, mas também a temperatura

dos painéis, local de instalação, evitando projeções de sombras e queda de objetos sobre os módulos, banco de baterias, etc. (Souza, 2016). Módulos fotovoltaicos são construídos para resistir às mais variadas intempéries, sejam causadas por eventos climáticos, até por erros humanos. Nesse sentido, sistemas de monitoramento são importantes no que tange à boa operação da planta, permitindo a comparação de dados observados com valores previstos, possibilitando que problemas sejam detectados no mínimo tempo possível, dando condições de realização de manutenções e reparos de emergência minimizando, assim, possíveis efeitos negativos na produção de energia elétrica (NREL, 2018).

Sistemas preditivos baseiam-se em modelos matemáticos. Um modelo matemático deve representar o modelo físico de forma precisa, com um erro ideal igual a zero. Para isso, a modelagem deve ser feita considerando o máximo de parâmetros possível. Na literatura há várias propostas de modelos que representam sistemas fotovoltaicos. Os mais adotados são aqueles baseados em circuitos elétricos, pois apresentam características mais próximas do sistema, visto que uma célula fotovoltaica se comporta como um diodo (Triki-

Lahini et al, 2017).

1.1 Problema

Módulos fotovoltaicos são elementos que geram corrente elétrica contínua através do efeito fotovoltaico, observado por Edmond Becquerel em 1839 (Nascimento, 2017), e, para isso, dependem basicamente de duas variáveis: irradiação solar e temperatura. Ambas as variáveis determinam o quanto de tensão e corrente elétricas são produzidas. Há uma relação entre estas variáveis de entrada e saída cujo comportamento pode ser replicado por meio de modelos matemáticos baseados em circuitos elétricos compostos por componentes que representam um diodo. Segundo Chen et al (2017), uma célula fotovoltaica pode ser modelada com uma fonte de corrente fotovoltaica I_{pv} , um diodo do tipo schockley, modelando a junção PN da célula, um resistor de desvio (*shunt*) R_{sh} , modelando a corrente de fuga, e um resistor série R_s , que modela a resistência de contato da célula. Mas alguns trabalhos sugerem modelos com dois e até três diodos, onde o segundo diodo modela a recombinação dos portadores na junção pn e na superfície (Albuquerque, 2017) e o modelo com três diodos modela células de silício multicristalino onde a adição de um terceiro diodo torna o modelo mais robusto, pois considera a granulação do material e a alta fuga de corrente elétrica (Nishioka, 2007). Cada módulo possui características que dependem de sua composição, como tipo e quantidade de células, características físicas e elétricas, etc. Estes dados são fornecidos pelos fabricantes e são utilizados nos projetos. Os valores de parâmetros fornecidos pelo manual do módulo, como tensão, corrente e potência máximas, tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, coeficientes de temperatura, etc. são valores obtidos em laboratório através de condições controladas padronizadas como as Condições Padrão de Testes, do inglês *Standard Test Condition* (STC) e a Temperatura Nominal de Operação da Célula, do inglês *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT). Estes parâmetros são inseridos nos modelos onde os valores de saída são comparados aos valores obtidos experimentalmente. Mas alguns parâmetros são difíceis de serem obtidos de forma experimental, como os valores do resistor de desvio R_{sh} e do resistor série R_s .

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são o estudo e modelagem de um módulo fotovoltaico de silício monocristalino, utilizando o modelo com dois diodos, para fins de comparação entre dados obtidos experimentalmente e por simulação, a partir de valores de diferentes parâmetros em condições padrão de testes (STC) e da determinação dos resistores R_s

e R_{sh} , parâmetros a serem ajustados. Para a determinação destes dois parâmetros um algoritmo é implementado no *software* Scilab®. Dados experimentais são coletados de um módulo fotovoltaico modelo SL5M36-20W da Solar Leading™, constituído de 36 células de silício monocristalino conectadas em série, utilizando um analisador de curva I-V, modelo PV-KLA da INGENIEURBÜRO™, e o *software* PVK® versão 5.11 do mesmo fabricante. Os valores encontrados de R_s e R_{sh} são referentes ao módulo, ou seja, são as resistências totais do conjunto de células que constituem o módulo. As comparações são realizadas com base nos dados comerciais do modelo e dos valores experimentais. Como resultado, espera-se a identificação do conjunto de parâmetros, em STC, mais preciso com referência aos dados experimentais.

2 Sistemas Fotovoltaicos

2.1 Introdução

Módulos fotovoltaicos são constituídos de células fotovoltaicas, fabricadas com materiais semicondutores, dispostas em matriz. As células são interligadas de forma serial (N_s), produzindo a soma das tensões geradas por cada uma. Alguns modelos podem ter séries conectadas paralelamente (N_p), o que produz a soma das correntes elétricas produzidas por cada série (figura 1). A quantidade de células em um módulo determina sua tensão e sua corrente de saída. Já um arranjo de módulos fotovoltaicos, dispostos conforme já mencionado, fornece a soma das tensões (arranjo em série) e das correntes de cada módulo (arranjo em paralelo). Para certos valores de potência, um módulo apenas pode não ser suficiente. Para isso, vários módulos podem ser interligados de forma a atenderem a demanda necessária de corrente e tensão.

O estudo do comportamento de módulos solares é baseado nos dados de duas curvas, I-V e P-V (figura 2), que relacionam corrente e tensão e potência e tensão, respectivamente. A partir destas curvas pode-se extrair o ponto de máxima tensão (V_{mp}), o ponto de máxima corrente (I_{mp}), o ponto de máxima potência (P_{mp}), que é a intersecção das retas formadas por V_{mp} e I_{mp} no gráfico da curva I-V, a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a potência máxima (P_{max}). O ponto de máxima potência (MPP) determina a máxima capacidade de um sistema fotovoltaico em fornecer corrente elétrica para níveis de irradiância G e temperatura T do arranjo. Para extrair esse máximo ponto de potência, inversores mais robustos, utilizados para converter corrente contínua (DC) em corrente alternada (AC), possuem um sistema que rastreia essa máxima potência, utilizando sistemas denominados Rastreadores de Ponto de Máxima Potência (MPPT), que ajusta a tensão de entrada

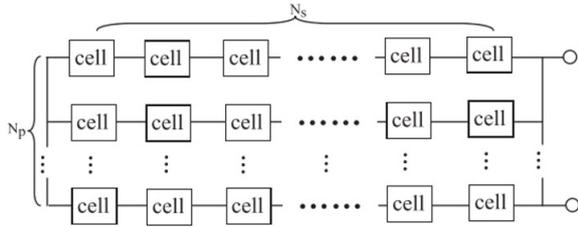


Figura 1: Configuração de um módulo com células em série (N_s) e séries em paralelo (N_p) (adaptado de Chen et al, 2017).

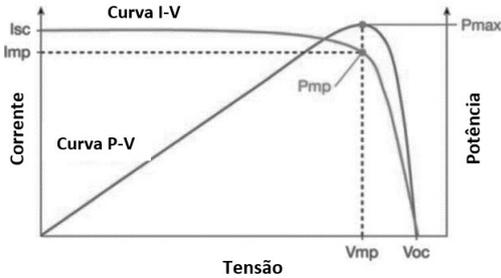


Figura 2: Curvas I-P e P-V (adaptado de Triki-Lahini et al, 2017).

do inversor com base na tensão de máxima potência (Souza, 2016). Análises das curvas I-V e P-V são realizadas em laboratórios com o uso de equipamentos específicos denominados analisadores ou traçadores de curva I-V, que permitem o levantamento de dados mais detalhados dos módulos. A partir da curva P-V é determinada a potência máxima P_{max} e, a partir do valor de tensão neste ponto (V_{mp}) na curva I-V, é determinado o valor da corrente máxima (I_{mp}).

2.2 Condições Padrão de Testes (STC) e Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT)

Cada fabricante fornece um conjunto de parâmetros de seus modelos de módulos que trazem informações técnicas que são imprescindíveis na concepção de projetos de sistemas fotovoltaicos, como tensões, correntes, potências, coeficientes de temperatura, rendimento, dimensão do módulo, curvas I-V e P-V, etc. Os dados elétricos são obtidos com base em valores padronizados de irradiação solar e temperatura em laboratório sob condições controladas. As condições mais adotadas são as Condições Padrão de Testes (STC), que utilizam valores de irradiação solar igual a 1000W/m^2 , temperatura no módulo igual a 25°C e massa de ar igual a 1.5 (Souza, 2016). A partir destes valores, são calculados os valores de tensão de circuito aberto, quando não há cargas entre os terminais do módulo, e de corrente de curto circuito, quando os terminais são conectados em curto-circuito. São fornecidos também os coeficientes de temperatura de tensão de circuito aberto, de corrente de curto-circuito e de potência máxima.

Entretanto, segundo Stern (2017), valores obtidos em testes laboratoriais sobre condições padrão de testes não refletem a operação real de módulos fotovoltaicos. Outro padrão de testes, denominado Temperatura Nominal de Operação da Célula, do inglês *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT) reflete de forma mais real o comportamento do módulo (Honsberg e Bowden, 2018), mas alguns fabricantes não fornecem os parâmetros do NOCT de seus módulos, como o módulo utilizado neste trabalho.

3 Modelos Matemáticos de Células Fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica pode ser modelada idealmente como um diodo Shockley (Chen et al, 2017). Mas o modelo ideal não considera parâmetros importantes como perdas no sistema. Para isso, um resistor em série (R_s) é adicionado ao modelo (figura 3). Este resistor representa a resistência do material com o qual a célula foi produzida (Andrianajaina et al, 2016). Este modelo é baseado em quatro parâmetros: corrente fotoelétrica I_{pv} , corrente de saturação do diodo I_0 , fator de qualidade (*quality factor*) do diodo a e resistência série R_s . A equação (1) descreve este modelo, onde q é a carga elementar do elétron, k é a constante de Boltzmann, N_c é o número de células do módulo, T é a temperatura do módulo e V e I são a tensão e a corrente de saída, respectivamente.

Para aumentar a precisão, muitos trabalhos adotam um modelo onde um resistor é adicionado em paralelo com o diodo (figura 4). Este resistor é denominado resistor *shunt* (R_{sh}) e representa perdas devido às correntes de fuga na junção pn (Andrianajaina et al, 2016). Com a adição deste resistor, este modelo passa a ser de cinco parâmetros, conforme equação (2).

Devido às características físicas das células fotovoltaicas de silício, modelos com um diodo não consideram as perdas devido à recombinação dos portadores da junção pn (Albuquerque, 2017). De acordo com Ishaque et al. (2011), uma célula solar apresenta perdas substanciais devido a essa recombinação, o que faz com que o modelo com um diodo não a represente adequadamente. Dessa forma, para representar células fotovoltaicas com maior precisão, alguns trabalhos sugerem a adição de um segundo diodo ao modelo (Ishaque et al., 2011, Chen et al., 2017). Assim, o modelo com dois diodos (figura 5) passa a oferecer mais eficiência que os modelos anteriores, o que foi comprovado pelos trabalhos de Ahmad, Sobhan e Nayan (2016), onde em todos os cenários a eficiência do modelo com dois diodos foi superior à do modelo com um diodo, em alguns casos maior que 3 pontos percentuais, e de Shannan, Yahaya e Singh (2013), que apontou percentuais de erros de potência menores no modelo com dois diodos em ce-

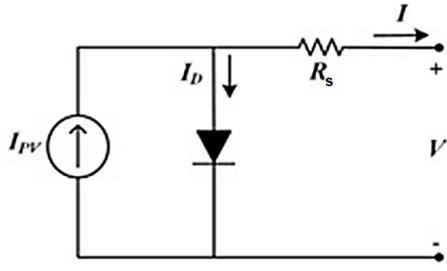


Figura 3: Modelo com um diodo e resistor série (Chin et al., 2015).

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{aN_c kT} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

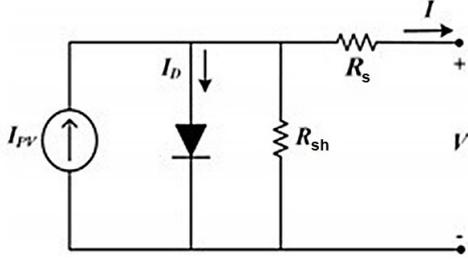


Figura 4: Modelo com um diodo, resistor série e resistor *shunt* (adaptado de Chin et al 2015).

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{aN_c kT} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

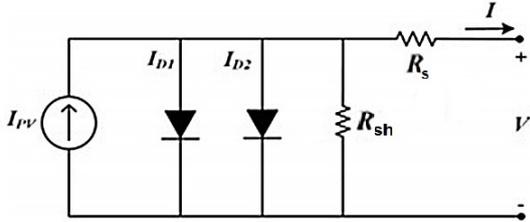


Figura 5: Modelo com dois diodos (adaptado de Chen et al, 2017).

$$I = I_{PV} - I_{01} \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{a_1 N_c kT} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{a_2 N_c kT} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{N_c kT} \right)} + e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{(p-1)N_c kT} \right)} + 2 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{(I_{sc,STC} + K_I \Delta T)}{\left(\frac{V_{oc,STC} + K_V \Delta T}{(a_1 + a_2) N_c kT} \right)^p} \quad (5)$$

$$I_{PV,n} = \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} I_{sc,STC} \quad (6)$$

$$I_{PV} = (I_{PV,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (7)$$

$$R_{sh,ini} = \frac{V_{mp}}{I_{sc} - I_{mp}} - \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (8)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{\left\{ I_{PV} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{N_c kT} \right)} + e^{\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{(p-1)N_c kT} \right)} + 2 \right] - \frac{P_{max}}{V_{mp}} \right\}} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{\sum_1^m |I_{sim} - I_{exp}|}{m} \times 100 \quad (10)$$

Tabela 1: Dados do módulo.

Módulo com 36 células monocristalina	
Parâmetros elétricos* (Tolerância de ±3%)	
Potência Máxima (Pmax)	20W
Tensão de máxima potência (Vmp)	17,28V
Corrente de Operação Máxima (Imp)	1,16A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	21,24V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	1,31A
Coefficiente de Temperatura de Pmax (Kp)	-0,48%/°C
Coefficiente de Temperatura de Voc (Kv)	-0,35%/°C
Coefficiente de Temperatura de Isc (Ki)	0,04%/°C
*Dados sob Condições Padrão de Teste (STC)	

nários com variação de irradiação e temperatura. A inserção do segundo diodo ao modelo adiciona mais dois parâmetros, somando sete no total, e é descrito pela equação (3). Foram adicionados as duas correntes de saturação dos diodos, I_{01} e I_{02} , e os dois fatores de qualidade, a_1 e a_2 .

Segundo Ishaque et al. (2011), I_{02} é de 3 a 7 vezes maior que I_{01} . Para reduzir a complexidade computacional eles propuseram fazer $I_{01} = I_{02} = I_0$, $a_1 = 1$ e $a_2 \geq 1.2$ e $(a_1 + a_2)/p = 1$, modificando a equação 3 para a equação 4. O presente trabalho adota este modelo para simulação e, por conseguinte, comparação dos resultados com os dados obtidos experimentalmente. A determinação de I_0 é feita através da equação 5, adaptada de Ishaque et al. (2011), e a corrente fotoelétrica I_{PV} , é determinada pelas equações 6 e 7, adaptadas de Villalva et al. (2009), onde $I_{PV,n}$ é a corrente fotoelétrica ajustada em termos de R_s e R_{sh} .

4 Aplicação do Modelo com Dois Diodos e Determinação dos Parâmetros R_s e R_{sh}

4.1 Introdução

Para a análise do modelo, foram coletados experimentalmente dados do módulo fotovoltaico, cujos dados fornecidos pelo manual comercial estão apresentados na tabela 1 (não foi identificado o ano do documento. Assim, a referência foi datada

Tabela 2: Dados do teste presente no manual (Solar Leading Group Ltd, 20??).

Módulo com 36 células monocristalina	
Parâmetros* do teste presente no manual	
Potência Máxima (Pmax)	20,493W
Tensão de máxima potência (Vmp)	17,291V
Corrente de Operação Máxima (Imp)	1,185A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	21,512V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	1,387A
*Dados sob Condições Padrão de Teste (STC)	

conforme a norma brasileira ABNT). Os parâmetros possuem uma tolerância de 3%. No manual também constam dados de teste experimental do modelo, como apresentado na tabela 2. Todas as informações disponibilizadas foram utilizadas no trabalho para a modelagem e comparação dos resultados.

Os valores dos fatores de qualidade a_1 e a_2 não são fornecidos pelos fabricantes. Com isso, adotou-se os seguintes valores: para a_1 o valor 1, em acordo com a teoria dos diodos Shockley (Sah et al, 1957), e para a_2 adotou-se o valor 1,8, conforme (Mcintosh et al, 2000). Assim, $a_1=1$ e $a_2=1,8$.

4.2 Coleta dos Dados Experimentais

A coleta dos dados foi realizada em um dia sem nuvens no céu, entre 11h e 12h da manhã em uma área da Universidade Federal de Sergipe. O procedimento consistiu em verificar a elevação do sol em relação ao local de medição, ajustar o módulo nesta elevação (aproximadamente $24,6^\circ$), aguardar a estabilização da temperatura do módulo e capturar a curva I-V pelo software PVK®.

O software mede os valores da irradiação solar, da temperatura do painel e os valores dos parâmetros elétricos a partir da curva I-V obtida. Com base nos valores dos parâmetros medidos, ele também estima os valores dos parâmetros V_{oc} , I_{sc} e P_{max} em STC. No passo seguinte, estes parâmetros foram inseridos no algoritmo de determinação dos valores dos resistores série R_s e R_{sh} .

4.3 Algoritmo de Determinação dos Resistores R_s e R_{sh}

Para a determinação destes dois parâmetros foi utilizado o algoritmo proposto por (Villalva et al., 2009), cujo fluxograma está ilustrado na figura 6, que consiste na busca iterativa de R_{sh} pelo incremento de R_s até que a potência máxima calculada seja igual ou próxima da potência máxima de referência, ou seja, até que o módulo da diferença destas duas potências ($\epsilon_{P_{max}}$) seja menor que um determinado valor de tolerância, cujo valor escolhido foi de 0,0001. Villalva et al. (2009) utilizou o modelo com um diodo. Para aplicação do seu algoritmo no presente trabalho foram feitas as se-

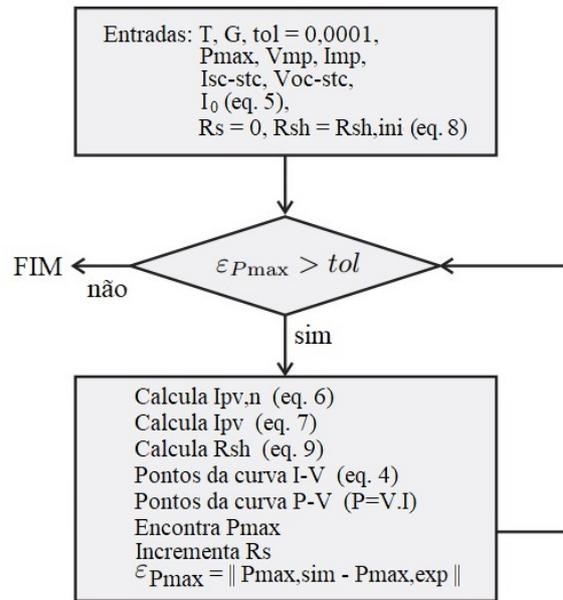


Figura 6: Algoritmo de determinação de R_s e R_{sh} (adaptado de Villalva et al., 2009).

guintes modificações: adição das variáveis de entrada a_1 e a_2 , cálculo de p e cálculo da corrente I conforme equação 4.

Os valores de entrada são a temperatura do módulo T , o nível de irradiação G , a tolerância de parada tol , a tensão de máxima potência V_{mp} , a corrente de máxima potência I_{mp} , a corrente de curto-circuito I_{sc} e a tensão de circuito aberto V_{oc} em STC, a corrente de saturação do diodo I_0 , e os valores iniciais de R_s e R_{sh} . R_s é incrementado em 0,001 a cada iteração e seu valor inicial de entrada é zero. Já o valor inicial de R_{sh} foi definido pela equação 8, adaptada de Ishaque et al. (2011). Os valores da tolerância tol e de incremento de R_s foram definidos mediante testes de convergência do algoritmo, sendo estes valores considerados satisfatórios para o experimento.

Após carregar os dados de entrada, o algoritmo verifica a condição de parada testando se $\epsilon_{P_{max}} \geq tol$. A parada se dá quando essa condição é falsa. Enquanto ela for verdadeira o algoritmo recalcula a corrente fotovoltaica I_{PV} , ajustada em termos de R_s e R_{sh} , a resistência R_{sh} , através da equação 9, adaptada de Ishaque et al. (2011), os pontos das curvas I-V e P-V e a partir destes pontos encontra a nova potência máxima e testa novamente a condição de parada.

Para a medida de ajuste da curva I-V foi utilizada a média percentual absoluta do erro MAPE, do inglês *Mean Absolute Percentage Error*, expressa pela equação 10, em relação às correntes I da simulação (I_{sim}) e do experimento (I_{exp}).

4.4 Simulação do modelo

Na simulação do modelo buscou-se a obtenção de curvas I-V e P-V mais próximas das curvas obtidas no experimento. Com os dados disponíveis, criou-se três possíveis cenários:

- Cenário 1 - Parâmetros em Condições Padrão de Testes fornecidos pelo manual comercial do módulo (tabela 1);
- Cenário 2 - Parâmetros em Condições Padrão de Testes obtidos no teste presente no manual do módulo (tabela 2);
- Cenário 3 - Parâmetros medidos em condições reais pelo *software* PVK®.

Os cálculos de I_0 e I_{PV} , equações 5 e 6, respectivamente, dependem dos valores de V_{oc} e I_{sc} em STC. Para encontrar os valores dos resistores R_s e R_{sh} neste cenário utilizou-se os valores destes dois parâmetros estimados pelo *software*. Os dados utilizados estão apresentados na tabela 3.

Para cada cenário o algoritmo encontrou os valores de R_s e R_{sh} . Com os três pares encontrados (cenário 1, 2 e 3) foram realizadas as simulações de cada cenário baseadas nos valores experimentais. Esta etapa foi realizada tomando os valores de V_{oc} e I_{sc} em STC de cada cenário para os cálculos de I_{pv} e I_0 . A comparação é realizada entre a curva I-V gerada na simulação e a curva I-V obtida no experimento. O resultado é a média percentual do erro de ajuste do modelo (MAPE) e os erros percentuais dos módulos das diferenças entre os parâmetros P_{max} , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc} da simulação e do experimento.

As curvas e os dados gerados foram analisados e os resultados são apresentados na seção seguinte.

5 Resultados

Em cada cenário, os valores dos seus respectivos parâmetros foram inseridos no algoritmo. As tabelas 4, 5 e 6 apresentam os valores gerados nas simulações e as figuras 7, 8 e 9 apresentam as curvas I-V e P-V das simulações e do experimento, bem como os valores dos pontos máximos e a o intervalo de tolerância de 3%.

5.1 Análise dos Resultados

A primeira observação a ser feita é relacionada aos valores dos parâmetros em STC estimados pelo *software*. Nota-se a discrepância em relação aos valores do manual do módulo, como também aos valores do teste presente no manual. Os valores medidos pelo analisador de curvas I-V possuem margem percentual de erro igual a $\pm 0,1\%$ (Ingenieurbüro, 2016). Outra observação é relativa aos valores dos parâmetros R_s e R_{sh} encontrados. Há

Tabela 3. Dados experimentais adquiridos do módulo.

Valores experimentais dos parâmetros	
Nível de Irradiação (G)	1124,9W/m ²
Temperatura do Painél (T)	50,300°C
Potência em ponto de máxima potência (P _{mp})	23,310W
Tensão de máxima potência (V _{mp})	15,870V
Corrente de Operação Máxima (I _{mp})	1,469A
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	18,180V
Corrente de Curto Circuito (I _{sc})	1,581A
Valores Estimados em Condições Padrão de Teste (STC)	
Potência em ponto de máxima potência (P _{mp})	23,060W
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	19,150V
Corrente de Curto Circuito (I _{sc})	1,388A

também uma grande divergência entre os valores encontrados nos cenários 1 e 2 em relação aos valores encontrados no cenário 3, com diferença de quase dez vezes, no caso de R_{sh} do cenário 2 em relação ao cenário 3. Isso já demonstra que os valores fornecidos pelo manual não são adequados para a modelagem do módulo, o que é corroborado pelos resultados obtidos.

- No cenário 1, o erro de ajuste (MAPE) ficou acima de 40% da curva I-V do experimento e os outros parâmetros estão acima da tolerância de 3% do fabricante.
- No cenário 2, apesar de a potência e da corrente de curto-circuito estarem dentro da tolerância dos valores do manual, o erro de ajuste foi maior que 50% e os demais parâmetros estão acima dos 3%.
- Já no cenário 3, uma vez que todos os parâmetros de referência são valores atuais e medidos pelo analisador, é esperado que os erros dos parâmetros estejam dentro da margem aceitável. Neste cenário o erro de ajuste foi de aproximadamente 3,31% e os parâmetros ficaram abaixo de 1%, com exceção da tensão de circuito aberto (V_{oc}), que ficou acima de 5%.

O resultado do cenário 3 em relação aos outros cenários, apesar do erro de V_{oc} maior que 3%, demonstra a importância de uma análise mais detalhada do módulo a ser modelado, uma vez que fatores como a degradação, vida útil, defeitos de fabricação ou mau uso e falta de cuidados podem contribuir com a alteração dos parâmetros elétricos dos módulos (Assunção, 2014). O módulo utilizado neste trabalho é de um modelo antigo e bastante utilizado.

6 Conclusões

Para o estudo do ajuste mais preciso do modelo com dois diodos, que representa o módulo fotovoltaico utilizado neste trabalho, foram definidos

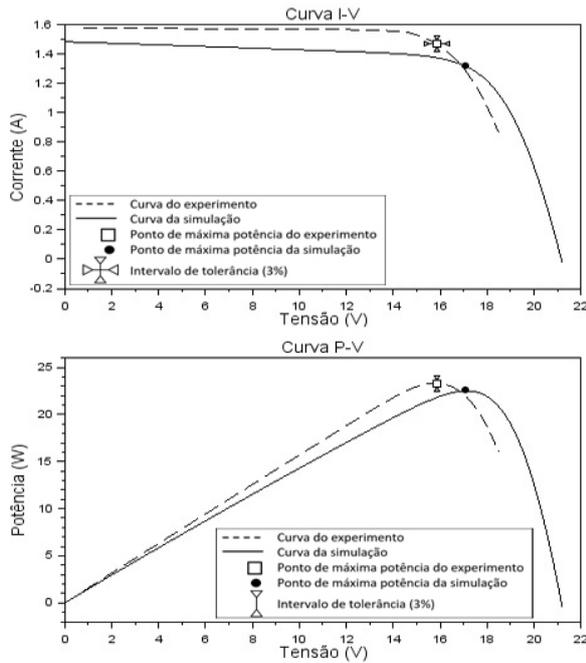


Figura 7. Curvas I-V e P-V do cenário 1.

Tabela 4. Valores obtidos do Cenário 1.

Valores da simulação do cenário 1	Erro (%)	
Potência máxima (Pmax)	22,500W	3,442%
Tensão de máxima potência (Vmp)	17,100V	7,886%
Corrente de máxima Potência (Imp)	1,316A	10,500%
Tensão de circuito aberto (Voc)	21,200V	16,610%
Corrente de curto-circuito (Isc)	1,484A	6,105%
Resistência série (Rs)	181,672Ω	-
Resistência <i>shunt</i> (Rsh)	0,895Ω	-
Erro de ajuste do modelo (MAPE)		41,910%

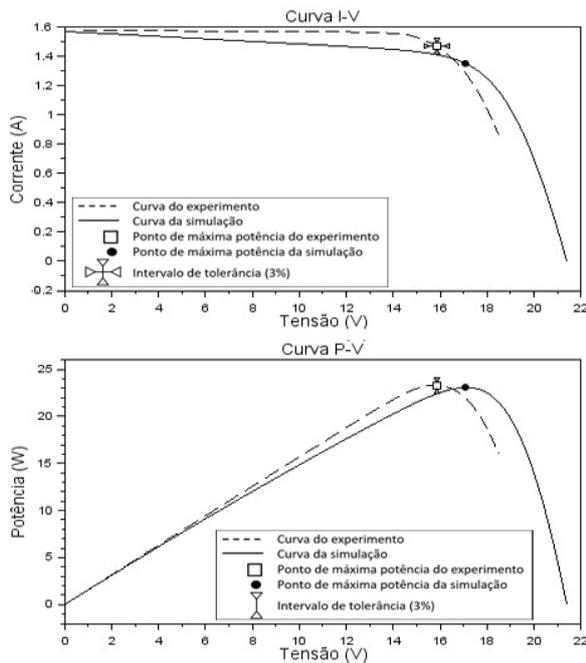


Figura 8. Curvas I-V e P-V do cenário 2.

Tabela 5. Valores obtidos do Cenário 2.

Valores da simulação do cenário 2	Erro (%)	
Potência máxima (Pmax)	23,090W	0,951%
Tensão de máxima potência (Vmp)	17,100V	7,886%
Corrente de máxima Potência (Imp)	1,350A	8,191%
Tensão de circuito aberto (Voc)	21,400V	18,260%
Corrente de curto-circuito (Isc)	1,571A	0,605%
Resistência série (Rs)	115,850Ω	-
Resistência <i>shunt</i> (Rsh)	1,034Ω	-
Erro de ajuste do modelo (MAPE)		52,060%

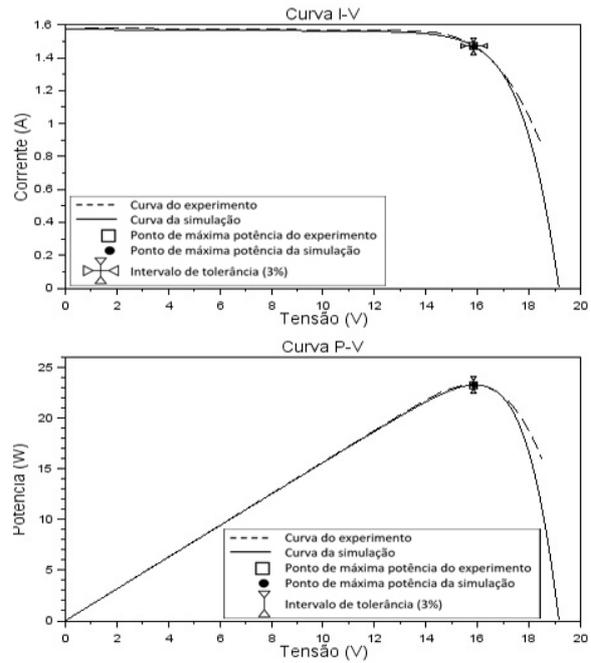


Figura 9. Curvas I-V e P-V do cenário 3.

Tabela 6. Valores obtidos do Cenário 3.

Valores da simulação do cenário 3	Erro (%)	
Potência máxima (Pmax)	23,310W	0,001%
Tensão de máxima potência (Vmp)	15,900V	0,315%
Corrente de máxima Potência (Imp)	1,466A	0,316%
Tensão de circuito aberto (Voc)	19,150V	0,522%
Corrente de curto-circuito (Isc)	1,573A	5,336%
Resistência série (Rs)	1076,300Ω	-
Resistência <i>shunt</i> (Rsh)	0,294Ω	-
Erro de ajuste do modelo (MAPE)		3,312%

três cenários. Em cada cenário foram usados parâmetros diferentes para o ajuste do modelo, cujos resultados foram comparados com dados adquiridos experimentalmente. A análise preliminar, a partir dos valores dos parâmetros de cada cenário, já apontava um desvio muito grande dos valores dos parâmetros elétricos do módulo medidos pelo analisador no tocante aos valores das suas especificações comerciais (em STC), o que foi comprovado pelas simulações do modelo.

Os resultados obtidos no presente trabalho sugerem a análise mais detalhada de módulos fotovoltaicos em projetos onde a precisão dos dados é um fator chave, como em sistemas de monitoramento. Um bom modelo matemático de sistemas fotovoltaicos, que são constituídos por muitos módulos, pode ser concebido mediante modelagem individual de cada módulo, uma vez que equipamentos apropriados, como um analisador de curvas I-V, pode fornecer os valores reais e atuais de cada um, permitindo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento robusto.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES, entidade do Governo Brasileiro voltada para a formação de recursos humanos.

Agradecemos ao o Prof. Dsc. Douglas Bressan Riffel do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Sergipe pelo apoio logístico na realização dos experimentos práticos.

Referências

- Ahmad, Tanvir and Sobhan, Sharmin and Nayan, Mr. Faysal (2016). *Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency*. p.31-46. Journal of Power and Energy Engineering
- Albuquerque, Felipe (2017). *Avaliação de Diferentes Métodos para Estimação da Resistência Série de Módulos Fotovoltaicos*. 85 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Politécnico de Bragança.
- Andrianajaina, Todizara and Sambatra, Eric Jean Roy and Andrianirina, Charles Bernard (2015). *PV fault detection using the least squares method*. p.846-851. IEEE.
- Assunção, Hélio Delgado (2014). *Degradação de Módulos Fotovoltaicos de Silício Cristalino Instalados no DEE - UFC*. 62 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará.
- Chen, Zhicong et al (2017). *Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and I-V characteristics*. v. 204, p.912-931. Elsevier.
- Chin,Vun Jack and Salam, Zainal and Ishaque, Kashif (2015). *Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review*. v. 154, p.500-519. Elsevier.
- Honsberg, Christiana and Bowden, Stuart (2018). *Nominal Operating Cell Temperature*, PVEducation. Nominal Operating Cell Temperature. Disponível em: <<http://pveducation.org/pvcdrom/modules/nominal-operating-cell-temperature>>. Acesso em: 09 abr. 2018.
- Ingenieurbüro Mencke & Tegmeyer (2016). *PV-KLA I-V Curve Analyser*. 34 p. Hardware Manual
- Ishaque, Kashif and Salam, Zainal and Taheri, Hamed (2011). *Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules*. p.586-594. Solar Energy Materials & Solar Cells
- McIntosh, Keith R. and Altermatt, Pietro P. and Heiser, Gernot (2000). *Depletion-Region Recombination in Silicon Solar Cells: When Does $mDR = 2$?* p.250-253. Researchgate.
- Nishioka, Kensuke et al (2007). *Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration*.v. 91, n. 13, p.1222-1227. Elsevier.
- NREL (2018). *Best Practices in Photovoltaic System Operation and Maintenance*, Denver: NREL. Technical report NREL/TP-7A40-67553. 128p. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67553.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2018.
- Nascimento, R.. (2017). *Energia Solar no Brasil: Situações e Perspectivas*, 46p. Câmara dos Deputados.
- Sah, Chih-Tang and Noyce, Robert N. and Shocley, William (1957). *Carrier Generation and Recombination in P-NV Junctions and P-N Junction Characteristics*. p.1228-1243. IRE.
- Shannan, Nahla Mohamed Abd Alrahim and Yahaya, Nor Zaihar and Singh, Balbir (2013). *Single-Diode Model and Two-Diode Model of PV Modules: A Comparison*. p.210-214. IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering
- Solar Leading Group Limited (20??). *Mono 20W Solar Panel*. 1 p. Disponível em: <http://www.solarbrasil.com.br/images/solarbrasil/downloads/SOLAR_LEADING_20W_.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2018.
- Souza, Ronilson di (2016). *Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica: Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares*. 114 p. Bluesol Energia Solar.
- Stern, Eliezer (2017). *NOCT x STC: Entenda a diferença entre estas condições*. Disponível em: <<https://krinatsolar.com.br/noct-x-stc-entenda-a-diferenca/>>. Acesso em: 27 mai. 2018.
- Triki-Lahiri, Asma and Abdelghani, Afef Bennani-ben and Slama-belkhdja, Ilhem (2017). *Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review*. Renewable And Sustainable Energy Reviews. Tunis, p. 2680-2692.
- Villalva, Marcelo Gradella and Gazoli, Jonas Rafael and Filho, Ernesto Ruppert (2009). *Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays*. p.1244-1254. IEEE.