

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijui

**APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO/COMPUTACIONAL NA
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE ENERGIA¹
APPLICATION OF A COMPUTATIONAL/MATHEMATIC MODEL IN
FOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION**

**Giordano Marholt Walker², Paulo S. Sausen³, Pedro G. Pascoal⁴, Gustavo
C. Lucca⁵, Catherine M. De Freitas⁶, Gabriel C. Santana⁷**

¹ Pesquisa Institucional desenvolvida no Departamento de Ciências Exatas e Engenharias (DCEEng) pertencente ao Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC)

² Bolsista PROBITI/Fapergs, aluno do curso de Engenharia Elétrica na UNIJUI - gi.walker@hotmail.com

³ Professor Orientador Dr. Paulo S. Sausen - sausen@unijui.edu.br

⁴ Bolsista PIBITI/CNPq, aluno do curso de Engenharia Elétrica na UNIJUI - pedropascoal01@hotmail.com

⁵ Bolsista PROBITI/Fapergs, aluno do curso de Engenharia Elétrica na UNIJUI - gusc,lucca2@gmail.com

⁶ Bolsista PIBITI/UNIJUI, aluna do curso de Engenharia Elétrica na UNIJUI - catherine.mf@hotmail.com

⁷ Bolsista PIBIC/UNIJUI, aluno do curso de Engenharia Elétrica na UNIJUI - gabriel_csantana@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Conforme o International Energy Outlook 2017 [1], a produção de energia renovável provenientes de fontes não hídricas crescerá cerca de 4,9% ao ano, de 2015 até 2040. Esta projeção é evidenciada pelo Estudo Estratégico de Geração Distribuída 2018 da Greener [2], o qual mostra que no Brasil, do final de 2016 até o final de 2017 a potência total conectada à rede, proveniente de painéis fotovoltaicos, aumentou de 59.985 para 160.933 kilowatt-pico (kWp), o que equivale a um aumento de 282%. Estes dados representam uma tendência de ampliação de Sistemas de Geração Distribuída (SGD) especialmente no segmento da energia solar. Neste sentido, estudos que possam contribuir para o desenvolvimento de alternativas otimizadas e economicamente viáveis passam a ter significativa importância [3].

Neste artigo será abordado a temática da GD no que se refere ao estudo e aplicação de um modelo matemático que possa simular um sistema de geração fotovoltaica residencial. Este modelo, posteriormente, será integrado ao modelo da rede de distribuição de energia da concessionária que é objeto de estudo de outro projeto.

METODOLOGIA

Este trabalho engloba duas etapas distintas, sendo elas a pesquisa bibliográfica relacionada ao assunto e as simulações e análise do modelo escolhido, realizando sua verificação com dados da literatura.

Sistemas fotovoltaicos são sistemas que utilizam várias células formadas por materiais

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

semicondutores, responsáveis por transformar energia luminosa proveniente do sol em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Tal efeito consiste na diferença de potencial gerada em materiais semicondutores resultantes da absorção da luz solar.

Para modelar um painel fotovoltaico é necessário inicialmente simular seu menor componente, a célula fotovoltaica. Tal modelagem consiste de dois passos principais, a estimação dos parâmetros necessários, e a utilização desses parâmetros com a equação modelada para produzir o gráfico do comportamento do painel (V-I) [4]. Esta curva (V-I) é a principal característica de modelagem das células fotovoltaicas, portanto, obtê-la é o principal objetivo da modelagem.

Dentre os artigos revisados [4-8], foi possível observar que existem vários modelos de circuitos equivalentes de células fotovoltaicas para simulação, que mesclam facilidade de modelagem com precisão. Dentre os modelos, podem ser citados o modelo empírico, de um diodo, de dois diodos como os mais utilizados na literatura técnica. Os três modelos podem ser observados na Figura 1.

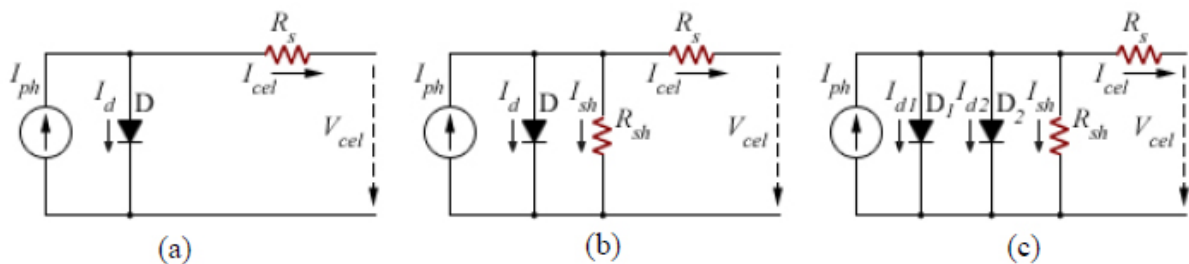


Figura 1 - Modelos de células fotovoltaicas. (a) Modelo empírico. (b) Modelo de um diodo. (c) Modelo de 2 diodos. Fonte: [5]

Dentre os modelos citados, o de um diodo (Figura 1.b) apresenta complexidade e performance moderada, sendo o modo mais aceito e utilizado para modelagem de células fotovoltaicas [5]. Ele também fornece características fotovoltaicas mais confiáveis, pois incertezas ambientais como mudanças de insolação e temperatura são consideradas [6]. Em razão destas características, o modelo de um diodo foi escolhido para ser aplicado neste trabalho.

No modelo escolhido, a fonte de corrente é a responsável por representar a corrente I_{ph} gerada pelo efeito fotoelétrico, e é diretamente proporcional ao nível de irradiação solar e inversamente proporcional a temperatura de operação da célula. O diodo representa a junção P-N da célula fotovoltaica. A primeira (R_{sh}) é a resistência relacionada à fabricação, relativa a correntes de fuga nas bordas da célula, microfissuras, defeitos, etc. A segunda (R_s) é a resistência da célula, relativa aos materiais utilizados e a junção dos materiais.

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_s \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

A relação (V-I) pode ser escrita utilizando a Lei de Kirchof para correntes no circuito equivalente (equação 1). Na equação, I_o é a corrente de saturação reversa do diodo, n_s é o número de células de um painel, k é a constante de Boltzmann e q é a carga do elétron (ambas constantes, 1.38×10^{-23} e 1.602×10^{-19} , respectivamente), T é a temperatura de junção da célula e A é o fator de qualidade do diodo. Desta equação, observa-se 5 incógnitas, I_{ph} , I_o , R_s , R_{sh} e A .

Para definir tais valores, utiliza-se três condições de operação da célula fotovoltaica, curto circuito

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijui

(0, I_{sc}), operação no ponto de máxima potência (V_{mp} , I_{mp}) e circuito aberto (V_{oc} , 0), respectivamente (equações 2 - 4).

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t} \right) \right] - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I_{mp} = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4)$$

Considerando estes pontos, é possível obter 5 operações com as 5 incógnitas (5). O desenvolvimento matemático pode ser observado em [7]. No entanto, tais equações levam a 3 equações não lineares, das 5 obtidas, com três parâmetros ainda não identificados: R_s , R_{sh} e A . Para obter-se tais equações existem diversos métodos computacionais, como Newton-Raphson, Gauss-Seidel, Lambert w-functions, entre outros. Neste artigo, utilizou-se o método de Gauss-Seidel, devido a sua facilidade de utilização e implementação. Os valores de R_s , R_{sh} e A obtidos com este método serão discutidos a seguir.

Tais equações baseiam-se em parâmetros fornecidos pelos fabricantes para condições padrões de teste (Irradiação solar 1000 W/m^2 e temperatura 25°C). Porém os painéis fotovoltaicos trabalham sobre condições atmosféricas variadas, e tais condições afetam diretamente a geração de energia. Neste sentido, é necessário considerar estas variáveis na modelagem.

De acordo com [4], a maior parte dos trabalhos relacionados ao tema consideram que A , R_s e R_{sh} permanecem constantes para diferentes condições atmosféricas. Apenas I_{ph} e I_o modificam-se conforme temperatura e irradiação.

Existem várias maneiras de relacionar estes parâmetros com as mudanças atmosféricas. Neste trabalho, o meio escolhido foi o que apresentou melhores resultados em [4], que relaciona I_{ph} e I_o a temperatura e irradiação com as equações 5 - 7.

$$I_o = I_{oSTC} \left[\frac{T}{T_{STC}} \right]^3 \cdot \exp \left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (5)$$

$$I_{oSTC} = I_{sc} \cdot e^{-\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n_s \cdot k \cdot T \cdot A} \right)} \quad (6)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \cdot (I_{scSTC} + K_i \Delta T) \quad (7)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realizar a verificação do modelo escolhido neste trabalho, utilizou-se os parâmetros de [4]. Para tal, utilizou-se como referência para os resultados o painel fotovoltaico SQ80, da fabricante Shell Solar. O mesmo possui 36 células conectadas em série, que geram picos de até 80W.

Utilizando as características elétricas do painel fornecidas pelo fabricante como entrada para o

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

método de Gauss-seidel desenvolvido, chegou-se aos resultados na Tabela 1. Também é possível observar os valores de referência utilizados.

	Simulação	Referência
Rs	0,3693	0,3085
Rsh	1315	1676
Vt	0,02468	0,02739
A	0,961	1,067
Io	$1,067 \cdot 10^{-10}$	$1,207 \cdot 10^{-9}$

Tabela 1 - Valores obtidos pelo método de Gauss-seidel. Fonte: Do autor

Analisando os dados da Tabela 1, é possível observar pequenas divergências entre os valores. Isto pode ser atribuído a diferença de parâmetros no método, como por exemplo, número de iterações e valor de erro máximo estabelecido. No entanto, tais valores podem divergir entre si, desde que o resultado final apresente similaridade.

Para simular o painel fotovoltaico, foram utilizadas as equações 1 e 3, implementadas a partir da utilização do software Matlab, mais precisamente da ferramenta Simulink, presente no Matlab. O modelo implementado baseia-se no trabalho desenvolvido em [4], tendo como entrada os valores de irradiação e temperatura, apresentando como saída o gráfico da Tensão x Corrente para os valores de entrada.

Para efeito de análise foram definidos dois cenários. No primeiro foi adotado as irradiações de 1000, 800, 600, 400 e 200 W/m² com a temperatura constante de 25°C. Já no segundo cenário a irradiação manteve-se constante em 1000 W/m², variando as temperaturas em 60, 50, 40, 30 e 20°C. Esses cenários foram definidos a partir das informações disponíveis no datasheet do painel disponibilizado pelo fabricante [9]. Devido a impossibilidade de validar o modelo usado a partir de dados reais de um painel fotovoltaico, foram utilizados os gráficos V-I para diferentes condições atmosféricas obtidas do datasheet do fabricante do painel (conforme cenários citados anteriormente). Para extrair tais dados, utilizou-se o software Engauge Digitizer que utiliza como entrada uma imagem do gráfico gerando um conjunto de coordenadas que podem ser utilizadas para verificação do modelo.

Os resultados das simulações para os dois cenários podem ser observados na Figuras 2. As linhas em vermelho demonstram o comportamento obtido a partir do modelo implementado e simulado, e as linhas em azul representam os valores obtidos a partir do datasheet do painel.

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijui

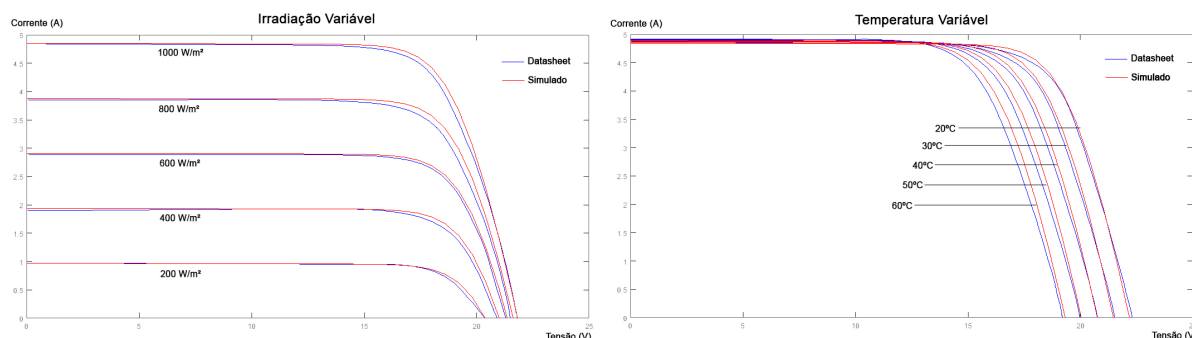


Figura 2 - Curvas de irradiação solar e temperatura - SQ80. Fonte: Do autor.

É possível observar que as curvas são semelhantes, mas que apresentam pequenas variações, essas diferenças ocorrem por diversos fatores. Dentre eles pode-se destacar a utilização do software Engauge Digitizer, a utilização de métodos numéricos que podem naturalmente introduzir um certo erro, como já mencionado anteriormente, e por último, o arredondamento e algumas simplificações realizadas durante o processo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo sem a possibilidade de validação através de dados reais, a verificação do modelo implementado foi realizada a partir de dados do datasheet do fabricante do painel fotovoltaico. Neste sentido ficou comprovado que o modelo foi implementado corretamente e que a partir dos resultados da análise comparativa foi possível verificar que o modelo representa satisfatoriamente a curva de corrente e tensão a partir da adoção do método de um diodo.

Como trabalhos futuros, propõem-se a validação do modelo apresentado neste trabalho, a partir da comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com dados reais coletados diretamente de um painel fotovoltaico.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Redes Inteligentes; Lei de Kirchhof; Energia Elétrica; Simulação.

Keywords: Distributed Generation; Smart Grids, Kirchhof Law, Electric Energy; Simulation.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNIJUI e a FAPERGS pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - EIA. International Energy Outlook 2017. Estados Unidos, 2017. Disponível em: Acesso em: 15 jun. 2018.
- [2] - GREENER. Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída. Brasil, 2018.
- [3] - NARUTO, D. T. Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica. 2017. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [4] - SHONGWE, S.; HANIF, M. Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 5, n. 3, p. 938-946, maio 2015.
- [5] - TAVARES, C. A. P. Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: Bolsistas de Iniciação Científica e Iniciação Tecnológica da Unijuí

Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[6] - HOSSEINI, S. et al. An approach to precise modeling of photovoltaic modules under changing environmental conditions. IEEE Electrical Power and Energy Conference, Canada, 2016.

[7] - CHATTERJE, A. et al. Identification of Photovoltaic Source Models. IEEE Journal of Transactions on Energy Conversion, v. 26, n. 3, p. 883 - 889, setembro 2011.

[8] - BELLIA, H.; FATIMA, M.; YOUCEF, R. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2014.

[9] - SHELL SOLAR. Shell PowerMax solar modules for off-grid markets. Disponível em: Acesso em: 29 jun. 2018.