

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Luís Guilherme Monteiro Oliveira – luis.monteiro@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia

Igor Carvalho Finelli – igorfinelli@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Paulo Henrique Breyner Saldanha de Oliveira – pbreyner@bol.com.br

Rafael Isaac Santos - r.isaacsantos@gmail.com

Lucas Bacha Pereira Horta - lucasbph@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia

Wilson Negrão Macedo – wnmacedo@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE)

Eduardo Nohme - nohme@cpdee.ufmg.br

Selênio Rocha Silva - selenios@dee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Bruno Marciano Lopes – bruno.marciano@cemig.com.br

Gerência de Alternativas Energéticas, Companhia Energética de Minas Gerais

Resumo. Este artigo consiste no desenvolvimento de uma ferramenta computacional e na validação de modelos matemáticos para módulos fotovoltaicos de forma a determinar as características elétricas de diferentes tecnologias sob condições operacionais distintas. Utilizou-se o software MATLAB® R2013a para a implementação de algoritmos dos modelos matemáticos propostos por Lorenzo e por De Soto. Os modelos matemáticos implementados permitem obter os parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico, corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de máxima potência (I_{mp}), tensão de máxima potência (V_{mp}) e ponto de máxima potência (P_{mp}) para qualquer condição de operação, ou seja, irradiância e temperatura da célula. A validação dos modelos e o cálculo de seus erros médios foram realizados utilizando medições em bancada de testes do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), inicialmente em duas tecnologias de módulos fotovoltaicos, silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), sob condições operacionais distintas.

Palavras-chave: Modelos Matemáticos, Parâmetros Elétricos, Células e Módulos Fotovoltaicos, Validação Dados.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da operação de células solares / módulos fotovoltaicos (FV) é embasada nas características elétricas da relação entre tensão e corrente sob diferentes condições meteorológicas de irradiância e temperatura da célula. Diversos modelos matemáticos de células e módulos foram desenvolvidos ao longo do tempo; dos mais simples, que utilizam modelos com simplificações e considerações, aos mais complexos, que detalham os processos físicos que ocorrem no interior das células FVs. Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, os projetistas necessitam de um modelo matemático confiável, preciso e de fácil aplicação, que realize a previsão dos parâmetros elétricos (tensão e corrente) e consequentemente da produção de energia, sob condições meteorológicas distintas, com menor margem de incertezas, para que haja um melhor retorno financeiro do investimento do projeto. Sendo assim, modelos mais simples vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, conforme descrito por Rauschenbach (1980), Townsend (1989), Eckstein (1990) e mais recentemente por De Soto, Klein e Beckman (2006) e King et al. (2004), e aplicados por softwares tais como: PVsyst, PVSol, SAM, Insel, Polysun etc.

Neste trabalho foram estudados dois modelos matemáticos propostos por Lorenzo et al. (1994) e De Soto, Klein e Beckman (2006), denominado de modelo de cinco parâmetros, considerados mais simples por utilizarem um circuito equivalente com apenas um diodo e por necessitarem apenas de dados disponibilizados pelos próprios fabricantes. Os mesmos foram implementados por meio do software MATLAB® R2013a e validados, através de dados de medição do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), para duas tecnologias de módulos fotovoltaicos, silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si), sob condições operacionais distintas. Nas próximas seções são apresentados os modelos citados, sua implementação, validação e análise dos erros médios.

2. CIRCUITO EQUIVALENTE E CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE UMA CÉLULA E MÓDULO FOTOVOLTAICO (MODELO DE 1 DIODO)

Quando uma célula fotovoltaica é exposta a irradiação solar, se a mesma estiver conectada a uma carga, uma corrente elétrica e uma diferença de potencial são produzidas em seus terminais decorrentes do efeito fotovoltaico. A célula fotovoltaica pode ser representada por um circuito equivalente que representará a variação da corrente (I) com a tensão (V) em seus terminais, conforme mostra a Fig. 1.

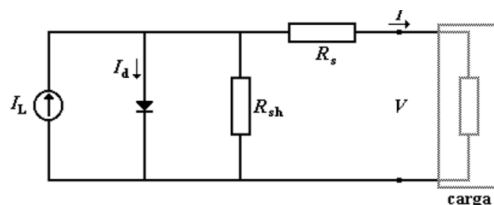


Figura 1 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica (Modelo de 1 diodo).

De acordo com o circuito equivalente apresentado na Fig. 1, o funcionamento intrínseco da célula fotovoltaica pode ser representado pela Eq. (1):

$$I = I_L - I_d \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_S}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{Sh}} \quad (1)$$

Na qual:

I_L : Corrente fotogerada (A);

I_d : Corrente reversa de saturação do diodo (A);

V: Tensão nos terminais da célula ou módulo fotovoltaico (V);

V_t : Tensão “térmica” que depende da temperatura da célula (T_c) e da constante de Boltzman (k) e da carga elétrica

$$(q) : V_t = \frac{k \cdot T_c}{q};$$

m: Fator de idealidade do diodo modificado que depende do número de células em série (N_s), fator de idealidade do diodo (n): $m = N_s \cdot n \cdot V_t$;

R_S : Resistência em série da célula;

R_{Sh} : Resistência “shunt” ou paralela da célula;

Para determinados valores (STC: “Standard Test Conditions”: 1000 W/m²; temperatura de célula, 25° C e massa de ar (AM) igual a 1,5) de irradiância (W/m²) e temperatura (°C) é possível obter os parâmetros elétricos da célula/módulo fotovoltaico e estabelecer a relação corrente x tensão (I x V), juntamente com a curva de potência (P x V), conforme exemplifica a Fig. 2.

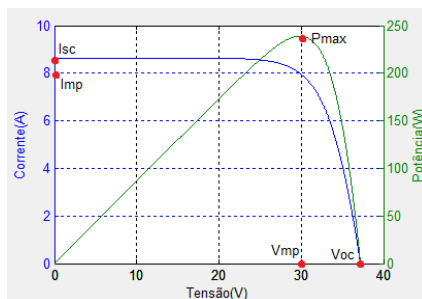


Figura 2 - Curva característica I-V (azul) e curva de potência P-V(verde) para o módulo fotovoltaico (m-Si) do fabricante Aleo, modelo S19G240, para as condições padrão de teste (STC).

A variação da irradiância e temperatura da célula afetam os parâmetros elétricos e conseqüentemente refletem na curva característica I-V da célula/módulo fotovoltaico conforme é possível observar nas Fig. 3 e Fig. 4.

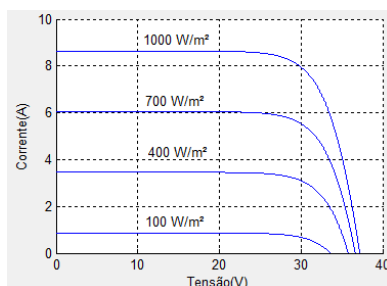


Figura 3 - Influência da variação da irradiância solar na curva I-V, para temperatura de célula fixa e igual a 25 °C, do módulo fotovoltaico Aleo, modelo S19G240.

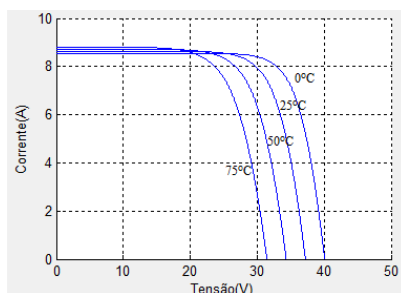


Figura 4 - Influência da variação da temperatura de célula na curva I-V, para irradiância fixa e igual a 1000 W/m², do módulo fotovoltaico Aleo, modelo S19G240.

Como é possível observar na Fig. 3, a variação da irradiância influencia significativamente os valores de corrente de curto (I_{sc}), porém a tensão de circuito aberto (V_{oc}) varia com menor intensidade. Na Fig. 4 pode-se observar que a variação de temperatura implica uma variação da tensão significativamente maior que a variação de corrente.

3. O MODELO MATEMÁTICO DE LORENZO PARA O MÓDULO FOTOVOLTAICO

O modelo matemático proposto por Lorenzo et al. (1994) permite obter a curva característica I-V, para qualquer condição de operação, para um módulo fotovoltaico monocristalino/policristalino. Um módulo fotovoltaico é constituído por um conjunto de células fotovoltaicas associadas eletricamente entre si por meio de conexões em série e paralelo. Normalmente as células fotovoltaicas que compõem um módulo fotovoltaico não são idênticas, o que torna os cálculos mais complexos, sendo assim, torna-se necessário considerar os seguintes critérios para simular o comportamento elétrico do módulo fotovoltaico:

- Os efeitos da resistência em paralelo (R_{sh}) são desprezíveis;
- A corrente fotogerada (I_L) e a corrente de curto circuito (I_{sc}) são iguais;
- $\exp\left(\frac{V+I.R_s}{V_t}\right) > 1$ para quaisquer condições de operação;
- Todas as células fotovoltaicas do módulo são idênticas e operam a um mesmo nível de irradiância solar e a uma mesma temperatura (T_c);
- As quedas de tensão nos condutores e nas interconexões das células fotovoltaicas são desprezíveis.

De acordo com Lorenzo et al. (1994), essas considerações levam a erros relativamente baixos para simular o comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino (m-Si e p-Si), que são, na atualidade, as tecnologias mais utilizadas e participam de 85% do mercado fotovoltaico (HERING, G., 2012). A corrente e a tensão de um módulo fotovoltaico podem ser obtidas pelas Eq. (2) e Eq. (3).

$$I_G = I \cdot N_p \tag{2}$$

$$V_G = V \cdot N_s \tag{3}$$

Nas quais:

N_p : número de células fotovoltaicas em paralelo;

N_s : número de células fotovoltaicas em série.

Substituindo as Eq. (2) e Eq. (3) na Eq. (1), pode-se obter a Eq. (4).

$$I_G = I_L - I_d \cdot \left[\exp\left(\frac{(V_G/N_s + (I_G \cdot R_s)/N_p)}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] - \left[\frac{(V_G/N_s + ((I_G \cdot R_s)/N_p))}{R_{sh}} \right] \cdot N_p \tag{4}$$

Levando em consideração os critérios (a), (b) e (c) e substituindo na Eq. (1) obtém-se a Eq. (5).

$$I = I_{SC} - I_d \cdot \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t}\right) \quad (5)$$

Quando a corrente (I) for igual a zero, é possível obter a equação da tensão de circuito aberto (Voc) descrita pela Eq. (6); e isolando (I_d) na Eq. (6), obtém-se a Eq. (7).

$$V_{OC} = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_d}\right) \quad (6)$$

$$I_d = I_{SC} \cdot \exp\left(-\frac{V_{OC}}{V_t}\right) \quad (7)$$

Substituindo a Eq. (7) na Eq. (5), obtém-se a Eq. (8), que é utilizada para definir a curva característica I-V do módulo fotovoltaico.

$$I = I_{SC} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I \cdot R_s}{V_t}\right)\right] \quad (8)$$

A mesma analogia do módulo FV é feita para um arranjo fotovoltaico, que é o conjunto de módulos fotovoltaicos associados eletricamente entre si por meio de conexões em série e paralelo. A corrente do arranjo fotovoltaico (I_{Arr}) é representada pela Eq. (9) abaixo.

$$I_{SCG} = I_G \cdot N_{GP} \quad (9)$$

Na qual (N_{GP}) representa o número de módulos fotovoltaicos em paralelo.

A tensão do arranjo fotovoltaico pode ser definida de acordo com a Eq. (10), onde (N_{GS}) representa o número de módulos fotovoltaicos em série:

$$V_{OCG} = V_G \cdot N_S \quad (10)$$

A resistência em série do arranjo fotovoltaico é dada pela Eq. (11).

$$R_{SG} = \frac{R_s \cdot N_S}{N_P} \quad (11)$$

Substituindo as Eq. (9), Eq. (10) e Eq. (11) na Eq. (8), obtém-se a Eq. (12) para a curva característica I-V para um arranjo fotovoltaico.

$$I_A = I_{SCG} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V_G - V_{OCG} + I_A \cdot R_{SG}}{N_S \cdot V_t}\right)\right] \quad (12)$$

Finalmente, a Eq. (12) é a equação transcendental utilizada na implementação da ferramenta computacional desenvolvida e é solucionada através do método iterativo e tradicional, desenvolvido por Newton - Raphson.

3.1 Determinação dos parâmetros elétricos para as condições padrão de teste (STC)

A potência do módulo fotovoltaico e seu ponto de máxima potência (Pmp) podem ser calculados pelas Eq. (13) e Eq. (14).

$$P = V \cdot I \quad (13)$$

$$P_{MAX} \Leftrightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \quad (14)$$

Diante da complexidade da resolução da equação transcendental, Eq. (12), torna-se necessária a utilização de métodos mais simples baseados na relação entre o fator de forma (FF) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}), definindo uma tensão normalizada (v_{oc}), uma resistência em série normalizada (r_s) e um fator de forma normalizado (FF_0), conforme mostram as Eq. (15), Eq. (16), Eq. (17) e Eq. (18), respectivamente.

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_t} \quad (15)$$

$$r_s = \frac{R_s}{\frac{V_{oc}}{I_{sc}}} \quad (16)$$

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = FF_0 \cdot (1 - r_s) \quad (17)$$

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad (18)$$

A tensão (V_{mp}) e a corrente (I_{mp}) no ponto de máxima potência podem ser obtidas por meio das Eq. (20) e Eq. (21), descritas a seguir:

$$\frac{V_M}{V_{oc}} = 1 - \frac{b}{v_{oc}} \cdot \ln(a) - r_s \cdot (1 - a^{-b}) \quad (20)$$

$$\frac{I_M}{I_{sc}} = 1 - a^{-b} \quad (21)$$

Nas quais os fatores (a) e (b) são encontrados pelas Eq. (22) e Eq. (23), respectivamente:

$$a = v_{oc} + 1 - 2 \cdot v_{oc} \cdot r_s \quad (22)$$

$$b = \frac{a}{1 + a} \quad (23)$$

Sendo que essas expressões são válidas para as seguintes condições: $v_{oc} > 15$ e $r_s < 0,4$ (Lorenzo et al., 1994).

3.2 Determinação dos parâmetros elétricos para quaisquer condições de operação

A tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito, para uma condição qualquer de operação, são obtidas por meio das Eq. (24) e Eq. (25), onde ($\beta_{V_{oc}}$) é o coeficiente de temperatura da tensão, geralmente fornecido pelo fabricante, e (G_i) é a irradiância solar que incide no plano do módulo fotovoltaico.

$$V_{oc_ger} = V_{ocG} \cdot N_{SG} - \beta_{V_{oc}} \cdot (T_{cel} - T_{ref}) \quad (24)$$

$$I_{scG} = C_1 \cdot G_i \quad (25)$$

Sendo C_1 uma constante definida pela Eq. (26).

$$C_1 = \frac{I_{scG}}{1000 \left(\frac{W}{m^2} \right)} \quad (26)$$

Como a irradiância possui pouca influência sobre a tensão de circuito aberto, ela pode ser desprezada da Eq. (24); da mesma forma a influência da temperatura na corrente será desconsiderada da Eq. (25). A resistência série é uma característica própria das células fotovoltaicas e não depende das condições de operação, podendo ser definida pela Eq. (27).

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_0} \right) \cdot \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (27)$$

Finalmente, de forma a tornar os modelos mais precisos e próximos da realidade, e conforme proposto por Gasparin e Bühler (2010), foram adotadas as seguintes correções: correção da tensão em função da irradiância, Eq. (28), a corrente em função da temperatura, Eq. (29), e a equação do fator de idealidade do diodo modificado, Eq. (30).

$$V_{oc_corr} = V_{oc_ger} + m \cdot V_t \cdot \ln \left(\frac{G_{med}}{G_{ref}} \right) \quad (28)$$

$$I_{sc_Ger} = I_{scG} \cdot N_{PG} \cdot \left(\frac{G_i}{G_{ref}} \right) + \alpha_{I_{sc}} \cdot (T_{cel} - T_{ref}) \quad (29)$$

Sendo m definido pela Eq. (30).

$$m = \frac{n \cdot k \cdot T_{cel} \cdot N_s}{q} \quad (30)$$

Sendo n definido como o fator de idealidade diodo (1 para diodo ideal, adotado para esse trabalho, k é a constante de Boltzaman $1,38 \times 10^{-23}$ e q é a carga elementar do elétron $1,6 \times 10^{-23}$).

4. O MODELO MATEMÁTICO DE DE SOTO PARA O MÓDULO FOTOVOLTAICO

Ao contrário do modelo apresentado anteriormente, o modelo matemático proposto por De Soto, Klein e Beckman (2006), denominado modelo de cinco parâmetros, pode ser aplicado para diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos (c-Si, P-si, disseleneto de cobre e índio - CIS, Telureto de Cádmio – CdTe). O mesmo utiliza uma equação semelhante à Eq. (1) para representar o circuito equivalente da célula fotovoltaica, conforme mostra a Eq. (31).

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{(V + I \cdot R_s)}{a}\right) - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (31)$$

Nas condições de curto-circuito, a tensão é zero e a corrente de diodo é muito pequena, como mostra a Eq. (31a).

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{(V+IR_s)}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] \cong 0 \quad (31a)$$

Logo, a corrente fotogerada é descrita pela Eq. (32).

$$I_{L,ref} = I_{SC} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \quad (32)$$

Cabe salientar que o valor encontrado pela Eq. (32), assim como os demais valores com índice *ref* nas condições de referência (STC) são utilizados como dados de entrada iniciais para a resolução das equações pelo método iterativo de Newton - Raphson. Nas condições de circuito aberto, a corrente é zero e o termo exponencial da Eq. (31) é maior que 1. Portanto, para essa condição, tem-se a Eq. (33).

$$I_{0,ref} = \left(I_{L,ref} - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc,ref}}{a}\right) \quad (33)$$

O valor da resistência “shunt” (R_{sh}) tende ao infinito para células mais modernas. Sendo assim, a Eq. (32) e a Eq. (33) podem ser simplificadas conforme é mostrado nas Eq. (34) e Eq. (35).

$$I_{L,ref} = I_{SC} \quad (34)$$

$$I_{0,ref} = I_{L,ref} \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc,ref}}{a}\right) \quad (35)$$

Os efeitos da temperatura nos parâmetros a , I_L e I_0 influenciam os módulos fotovoltaicos de acordo com a Eq. (36), Eq. (37), Eq. (38) e Eq. (39).

$$a_{ref} = \frac{n \cdot k \cdot T_{c,ref} \cdot N_s}{q} \quad (36)$$

$$a = a_{ref} \cdot \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (37)$$

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} \cdot [I_{L,ref} + \alpha_{isc} \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad (38)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left[\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right]^3 \cdot \exp\left[\frac{E_g \cdot N_s}{a_{ref}} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right) \right] \quad (39)$$

Nas quais:

E_g : energia da banda proibida do material (1,12 eV para o Si);

N_s : é o número de células fotovoltaicas em série em um módulo;

S : é a radiação solar efetiva absorvida. Para este estudo, considera-se S/S_{ref} igual à radiação solar no plano do módulo fotovoltaico, já que seu valor depende de muitos fatores e é de difícil obtenção.

Substituindo na Eq. (28) as condições de máxima potência ($V=V_{mp}$ e $I=I_{mp}$), sendo que $I_{L,ref}$ e $I_{0,ref}$ foram obtidos das Eq. (31) e Eq. (32), respectivamente, e desprezando-se novamente o valor “1” na Eq. (28), uma vez que o termo exponencial na condição de máxima potência é também muito maior que “1”; o resultado é apresentado pela Eq. (37).

$$I_{mp} = I_{L,ref} - I_{L,ref} \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc,ref}}{a}\right) \cdot \exp\left(\frac{(V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{s,ref})}{a_{ref}}\right) \quad (37)$$

Isolando $R_{s,ref}$ da Eq. (37), obtém-se a Eq. (38), que pode ser simplificada pela Eq. (39).

$$R_{s,ref} = \frac{a_{ref} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{L,ref}}\right) - V_{mp} + V_{oc,ref}}{I_{mp}} \quad (38)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (39)$$

Se o valor de a_{ref} , determinado pela Eq. (36) for maior que zero, porém menor que o valor máximo obtido da Eq. (38) (para $R_s = 0$), então o modelo para determinar as características I-V da célula/módulo FV está completo. Caso contrário, mais iterações serão necessárias para que haja convergência para as condições citadas anteriormente.

Finalmente, a potência de saída do sistema é calculada pela Eq. (13). Sendo assim, o valor de máxima potência é encontrado através da variação da tensão (V) na curva P-V até que a máxima potência seja encontrada. Cabe salientar que da mesma maneira que no modelo de Lorenzo, a Eq. (28) foi adotada para melhorar a aproximação de V_{oc} no modelo de De Soto.

5. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE LORENZO E DE SOTO

Como já descrito, os modelos foram validados através de dados de medições de diferentes painéis em uma bancada de testes do laboratório GEDAE, na UFPA. A Fig. 5 mostra a área de testes dos módulos fotovoltaicos do GEDAE/UFPA e a Tab. 1 contém os dados de placa, em STC, dos dois módulos fotovoltaicos utilizados para a validação do software dos modelos de Lorenzo e De Soto.

Para validar os modelos descritos anteriormente, foi realizada a coleta de dados, de forma inicial, em duas tecnologias de módulos fotovoltaicos (monocristalino e policristalino), de fabricantes de diferentes, com potências de pico próximas e sob condições de operação distintas. A Fig. 5 mostra a área de testes dos módulos fotovoltaicos e a Tab. 1 mostra os dados de “placa”, em STC, para cada um dos módulos fotovoltaicos utilizados para a validação dos modelos de Lorenzo e de De Soto.



Figura 5 - Área de teste para diferentes módulos fotovoltaicos no GEDAE/UFPA.

Tabela 1 - Especificações elétricas dos módulos fotovoltaicos utilizados para as condições padrões de teste (STC).

| Parâmetros Elétricos | Aleo S19G240 | Solar World 235 |
|--|----------------|-----------------|
| Máxima Potência (Pmp) | 240 W | 235 W |
| Tensão de Máxima Potência (Vmp) | 29,7 V | 30 V |
| Corrente de Máxima Potência (Imp) | 8,09 A | 7,85 A |
| Tensão de Circuito Aberto (Voc) | 37,2 V | 37 |
| Corrente de Curto-Circuito (Isc) | 8,6 A | 8,35 A |
| Coefficiente de temperatura (α) | 3,45 mA/°C | 2,84mA/°C |
| Coefficiente de temperatura (β) | -0,115 V/°C | -0,125V/°C |
| Número de células em série | 60 | 60 |
| Tipo de Tecnologia | Monocristalino | Policristalino |

A bancada de testes mostrada na Fig. 5 tem capacidade de medição para 14 módulos fotovoltaicos, e realiza medições dos parâmetros elétricos (Voc, Vmp, Imp, Isc e Pmp) para cada módulo fotovoltaico. Para a coleta da temperatura de célula há um sensor do tipo Pt100 anexado na parte posterior de cada um dos módulos FV e quatro sensores de irradiância tipo célula fotovoltaica. Um sensor monocristalino e um policristalino medem a irradiância global, enquanto os outros dois sensores, um monocristalino e um policristalino, medem o albedo.

A medição dos dados é realizada por uma placa de aquisição, que possui os sensores de corrente e tensão além de uma carga eletrônica responsável pelo levantamento das curvas I xV. Os dados foram coletados de minuto em minuto, durante cinco dias, para diferentes condições meteorológicas (irradiância e temperatura), entre os horários de 5 horas da manhã até às 19 horas da noite, e enviados para um “datalogger”, para armazenamento dos mesmos. Esses dois dispositivos, além de conterem uma fonte para energizar todo sistema de aquisição, estão alocados dentro de um quadro que possui a finalidade proteger esses dispositivos de elementos externos, além de manter organizados os equipamentos.

Para a comunicação de dados é utilizado um “Data Center” localizado no servidor do laboratório, que realiza a transmissão de dados entre os “dataloggers” e os computadores através da intranet. Esse equipamento possui um ambiente virtual no qual é possível configurar via protocolo FTP (“File Transfer Protocol”) um servidor para envio dos dados contidos no “datalogger”.

Após a coleta dos dados, foi realizado o tratamento estatístico dos mesmos como uma forma inicial de avaliar os resultados gerados pelos dois modelos implementados em relação aos dados medidos em campo, portanto foram utilizadas duas figuras de mérito estatístico comumente usadas na literatura (Stone, R., 1993; Gueymard, C., 2009; Falayi et al., 2011; Ineichen, P., 2011): o erro médio sistemático (“Means Bias Error” - MBE) e a raiz do erro médio quadrático (“Root Mean Square Error” - RMSE). As Eq. (40) e Eq. (41) mostram a forma matemática para esses dois erros.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (K_{calculado} - K_{medido})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

$$MBE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (K_{calculado} - K_{medido}) \quad (41)$$

Nas quais:

Kmedido: dados coletados em campo;

Kcalculado: dados gerados pelo modelo;

De acordo com Falayi et al. (2011), essas ferramentas estatísticas demonstram a qualidade média dos resultados gerados pelos modelos em relação ao valor medido, sendo que o indicador RMSE fornece a informação a curto prazo do rendimento das correlações permitindo a comparação, termo a termo, do desvio atual entre os valores coletados em campo e os valores resultados do modelo (valores simulados). Quanto menor o indicador RMSE, mais precisa é a estimativa. O MBE por sua vez oferece uma média polarizada/sistemática, “bias” dos erros, ou seja, há tendência geral dos dados gerados pelo modelo serem maiores ou menores que os dados coletados, sendo que a precisão do modelo não pode ser diretamente avaliada através do MBE. O RMSE é dito não sistemático.

Nas Tab. 2 e Tab. 3 são apresentados os erros RMSE e MBE para uma média de todos os dados coletados para os módulos fotovoltaicos monocristalino e policristalino utilizados, bem como o equivalente percentual desses indicadores em relação aos dados simulados.

Tabela 2 - Resultados para os indicadores MBE e RMSE para os modelos de De Soto e de Lorenzo utilizando o módulo fotovoltaico monocristalino (Aleo S19G240).

| Aleo- S19G240 - DeSoto | | | | | | Aleo- S19G240 - Lorenzo | | | | | |
|------------------------|--------|------|--------|------|-------|-------------------------|--------|------|--------|-------|--------|
| | Placa | RMSE | rmse % | MBE | mbe % | | Placa | RMSE | rmse % | MBE | mbe % |
| Isc | 8,64 A | 0,14 | 1,57% | 0,01 | 0,16% | Isc | 8,64 A | 0,13 | 1,54% | -0,04 | -0,41% |
| Voc | 37,2 V | 0,73 | 1,96% | 0,36 | 0,97% | Voc | 37,2 V | 0,43 | 1,16% | 0,32 | 0,87% |
| Pmax | 240 W | 7,60 | 3,17% | 3,93 | 1,64% | Pmax | 240 W | 5,42 | 2,26% | -1,27 | -0,53% |
| Imp | 8,09 A | 0,08 | 0,95% | 0,02 | 0,30% | Imp | 8,09 A | 0,17 | 2,14% | -0,15 | -1,86% |
| Vmp | 29,7 V | 0,86 | 2,90% | 0,29 | 0,98% | Vmp | 29,7 V | 1,08 | 3,63% | -0,01 | -0,03% |

De acordo com a Tab. 2, é possível observar que o indicador rmse (%) utilizando os modelos de Lorenzo e de De Soto apresentaram resultados diferentes para os parâmetros elétricos de Voc, Imp e Vmp e similares no ponto de Isc, sendo que o ponto Pmax apresentou uma diferença da ordem de 0,91% mostrando que para esse quesito o modelo de Lorenzo acarretou melhor qualidade. Já o indicador mbe (%) mostra que o modelo de De Soto tende a sobreestimar todos os pontos, ou seja, Isc, +0,16%, Voc,+0,97%, Imp,+0,30%, Vmp,+0,98%, e Pmáx, +1,64%, enquanto que o modelo Lorenzo tende a subestimar a maioria dos parâmetros elétricos, ou seja, Isc, -0,41, Imp,-1,86%, Vmp,-0,03% e Pmáx, -0,53%, porém, Voc,+0,87%, é sobreestimado. A Tab. 3 mostra os resultados encontrados para os indicadores MBE e RMSE para os modelos de De Soto e de Lorenzo utilizando o módulo fotovoltaico policristalino (Solar World SW 235).

Tabela 3 – Resultados para os indicadores MBE e RMSE para os modelos de De Soto e de Lorenzo utilizando o módulo fotovoltaico policristalino (Solar World SW 235).

| Solar Word SW 235 - DeSoto | | | | | | Solar Word SW 235 - Lorenzo | | | | | |
|----------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-----------------------------|--------|------|--------|-------|--------|
| | Placa | RMSE | rmse % | MBE | mbe % | | Placa | RMSE | rmse % | MBE | mbe % |
| Isc | 8,35 A | 0,25 | 2,98% | 0,19 | 2,32% | Isc | 8,35 A | 0,09 | 1,06% | -0,02 | -0,25% |
| Voc | 37 V | 1,17 | 3,18% | 1,06 | 2,86% | Voc | 37 V | 0,64 | 2,39% | 0,63 | 2,35% |
| Pmax | 235 W | 14,19 | 6,17% | 11,11 | 4,83% | Pmax | 235 W | 6,52 | 2,84% | 2,38 | 1,03% |
| Imp | 7,85 A | 0,26 | 3,31% | 0,21 | 2,75% | Imp | 7,85 A | 0,12 | 1,49% | -0,10 | -1,28% |
| Vmp | 30 V | 1,10 | 3,69% | 0,97 | 3,24% | Vmp | 30 V | 1,11 | 3,72% | 0,62 | 2,08% |

Para o módulo fotovoltaico policristalino Solar World SW235 apresentado na Tab. 3, o indicador rmse (%) utilizando o modelo de Lorenzo tende a ser de melhor qualidade em relação ao modelo de De Soto. Para a maioria dos parâmetros elétricos, ou seja, Isc, Voc, Pmáx e Imp, o modelo de Lorenzo apresentou resultados melhores e somente para o ponto Vmp o modelo de Lorenzo apresentou similaridade com o modelo de De Soto. Em relação ao indicador mbe (%), o modelo de De Soto sobreestima todos os parâmetros elétricos. Já o modelo de Lorenzo, Isc (-0,25%), é subestimado, bem como Imp (-1,28%), sendo que os demais parâmetros são sobreestimados. A Fig. 6 mostra os gráficos gerados pela ferramenta computacional desenvolvida, para as curvas características IxV, dos dados coletados e simulados pelos modelos de Lorenzo e de De Soto para uma determinada condição de operação.

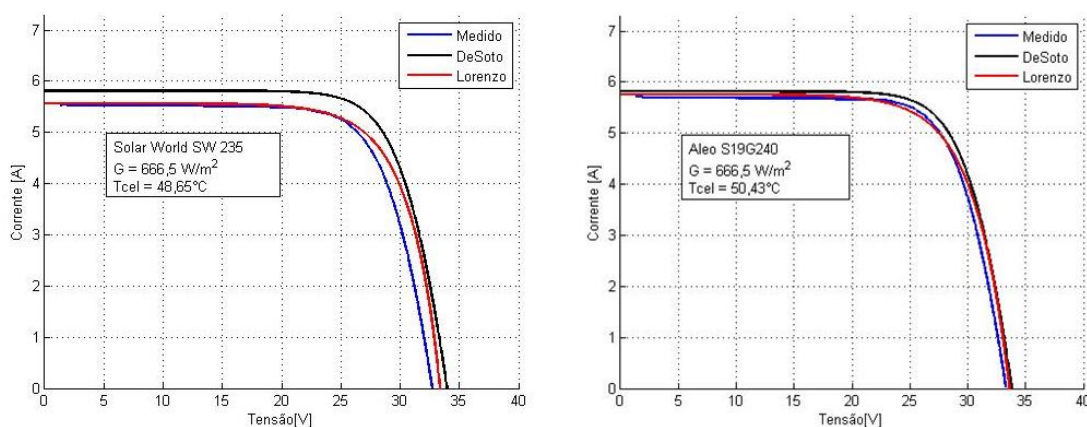


Figura 6 - Curvas I xVs dos dados coletados e simulados para uma determinada condição de operação.

De acordo com a Fig. 6, as curvas I xVs para o módulo fotovoltaico Aleo (m-Si) mostram uma boa aproximação do modelo proposto por Lorenzo (curva vermelha), para todos os parâmetros elétricos (Pmáx, Isc, Imp, Vmp e Voc), com os dados coletados (curva azul). Por outro lado, e conforme já constatado, apesar de o modelo de De Soto ter apresentado também bons resultados para o mesmo módulo fotovoltaico, sua curva I xV (curva preta) mostra um pequeno afastamento do ponto Pmáx, Voc, Imp e Vmp em relação aos dados medidos (curva azul).

Em relação ao módulo fotovoltaico SW235 (p-Si), os modelos se afastaram da curva azul (medido) principalmente nos pontos Pmáx e Vmp (curvas preta e vermelha). Porém, através da Fig. 6, é possível observar que o modelo de Lorenzo (curva vermelha) se aproximou mais dos dados coletados sendo que no ponto Pmáx, na figura de mérito estatístico, %mbe, para esse modelo, o valor é sobreestimado em apenas 1% aproximadamente, já para o modelo de De Soto, Pmáx apresentou um valor sobreestimado mais elevado, ou seja, 4,83%, resultando em uma diferença de 3,8% entre os modelos, para esse ponto, conforme já apresentado na Tab. 3.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados dois modelos matemáticos para módulos fotovoltaicos, baseados no modelo de 1 diodo, e propostos por Lorenzo et al. (1994) e De Soto, Klein e Beckman (2006) os quais são modelos simples, pois são embasados apenas nos dados disponibilizados pelos fabricantes. Os mesmos foram implementados utilizando o software MATLAB® R2013a, e validados utilizando figuras de mérito estatístico, na área de testes GEDAE/UFPA, para duas tecnologias, silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si), sob condições operacionais distintas.

De uma forma geral, nessa primeira avaliação, os resultados encontrados pelos modelos de De Soto e Lorenzo para o módulo fotovoltaico m-Si (Aleo) apresentou resultados melhores (rmse% e mbe%) e mais próximos aos dados de campo em comparação aos resultados encontrados para o módulo p-Si (Solar World). Porém, acredita-se que os erros existentes nos modelos ocorrem devido a algumas considerações adotadas em sua resolução, tais como: o fator de idealidade do diodo (n) ser igual a 1 e o valor da resistência em série ser constante para qualquer condição de operação.

Em particular, para o modelo de De Soto, acredita-se que os erros médios encontrados, em sua grande maioria, foram maiores devido à forma de se resolver a equação transcendental, onde diversas equações foram adotadas para calcular os parâmetros (a_{ref} , $R_{s,ref}$, $I_{0,ref}$ e $I_{L,ref}$), porém todas deveriam ser resolvidas por métodos numéricos, sendo que somente a equação da corrente, Eq. (31), que considera R_{shunt} tendendo ao infinito, foi resolvida por método numérico. O modelo de Lorenzo resolve apenas a equação da corrente pelo método numérico e foi suficiente para que o modelo apresentasse um bom resultado. Cabe salientar que a consideração realizada nas Eq. (28), (29) e (30), utilizadas para corrigir a tensão em função da irradiância, a corrente em função da temperatura e a equação do fator de idealidade do diodo modificado foram adotadas neste trabalho para tornar os modelos mais precisos e próximos da realidade.

Finalmente, como os estudos se encontram em fase inicial, melhoras nos dois modelos serão ainda implementadas, como é o caso de aplicação de um método para se estimar o fator de idealidade do diodo (n), ex: Phang et. al. (1984), e o estudo da propagação das incertezas na instrumentação utilizada. Esses estudos poderão melhorar os resultados e, assim, obter uma validação desses modelos de forma mais precisa e próxima da realidade. É importante frisar também que com a continuidade da pesquisa outras tecnologias de módulos fotovoltaicas (CdTe, CIS, a-si) serão consideradas, aumentando dessa forma a aplicabilidade, principalmente do modelo proposto por De Soto.

Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito da Chamada Estratégica 13 do Programa de P&D Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL. Ao GEDAE/UFPA pelo apoio. Ao Fundo de Incentivo à Pesquisa (FIP) da PUC Minas, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- De Soto, W.; Klein, A.; Beckman, W. A., 2006. Improvement and Validation of Model for Photovoltaic Array Performance. *Solar Energy*, v. 80, 78.
- Eckstein, J., 1990. Detailed Modelling of Photovoltaic Systems Components. Dissertação de Mestrado (Master's Thesis), Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison.
- Falayi, E.; Rabiou, A.; Teliat, R., 2011. Correlation to Estimate Monthly Mean of Daily Diffuse Solar Radiation in Some Selected Cities in Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, vol. 2, no 4, pp. 480-490.
- Gasparin, F., P. e Bühler, A., J., 2010. Influência da temperatura na medida de irradiância solar com células de referência de silício cristalino, III Congresso Brasileiro de Energia Solar - Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.
- Gueymard, C., 2009. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 432-444. Erratum, *Solar Energy*, 1988, vol. 40, no.2, p. 175.
- Ineichen, P., 2011. Global Irradiance on tilted and oriented planes: model validations. technical report. University of Geneva.
- King, D. L.; Boyson, W.E.; Kratochvil, J. E., 2004. Photovoltaic Array Performance Model. Sandia National Laboratories Report SAND2004-35353.
- Lorenzo, E.; Araujo, G.; Cuevas, A.; Egido, M.; Minano, J.; Zilles, R., 1994. *Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos*. 1st Edition, PROGENSE S.A., Sevilla. Spain.
- Phang, J. C. H., Chan, D. S. H., Phillips, J. R., 1984. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters, *Electronic Letters*, vol. 20, n. 10, pp 406-408.
- Rauschenbach, H. S., 1980. *Solar Cell Array Design Handbook: The principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Stone, R., 1993. Improved Statistical Procedure for the Evaluation of Solar Radiation Estimation Models. *Solar Energy*, vol. 51, no 4, pp. 289-291.
- Townsend, T. U., 1989. A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems. Dissertação de Mestrado (Master's Thesis), Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison.

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF MATHEMATICAL MODELS FOR PV GENERATORS

Abstract. *This article is the development of computational tools and validation of mathematical models for PV modules in order to determine the electrical characteristics of different technologies under different operating conditions. MATLAB® R2013a was used to implement algorithm grounded in mathematical models proposed by Lorenzo and by De Soto. The implemented mathematical models allow to obtain the electrical parameters of a PV module, short-circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), maximum power current (I_{mp}), maximum power voltage (V_{mp}) and maximum point power (P_{mp}) for any operating condition, solar irradiance and cell temperature. The validation of the models and definition of their mean errors was made with measurement data performed on the test bench of the Group of Studies and Development of Energy Alternatives (GEDAE) of the Federal University of Pará (UFPA), initially on two technologies of photovoltaic modules, monocrystalline silicon (m-Si) and polycrystalline silicon (p-Si) under different operating conditions.*

Keywords: Mathematical Models, Electrical Parameters, Cells and Module Photovoltaic, Validation Data.