

## Estimativa dos parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico a partir do modelo de um único diodo

### Estimation of the electrical parameters of a photovoltaic module using a single diode model

R C Surichaqui <sup>1</sup>, M N Frota <sup>1</sup>, E M Ticona <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; <sup>2</sup> Instituto de Energia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

E-mail: mfrota@puc-rio.br

**Resumo:** Este artigo propõe uma alternativa simplificada para estimar os parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico. A metodologia de cálculo, que fundamenta-se no circuito equivalente de um único diodo e em especificações técnicas do fabricante do módulo fotovoltaico, mostrou-se eficaz ao reproduzir com exatidão as características elétricas (curvas-padrão corrente-tensão, I-V e potência elétrica-tensão, P-V) do módulo fotovoltaico.

**Palavras-chave:** módulo fotovoltaico, conversão fotovoltaica, modelagem, modelo de um único diodo, parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico.

**Abstract:** This paper proposes a simplified alternative to simulate the electrical parameters of a PV module. The simulation, which is based on the equivalent circuit of a single diode and on technical specifications of the manufacturer's photovoltaic module, proved to be effective and accurate to reproduce the electrical characteristics (standard current-voltage and power voltage curves) of the PV module.

**Keywords:** PV module, photovoltaic conversion, modeling, single-diode model, PV electrical parameters.

## 1. INTRODUÇÃO

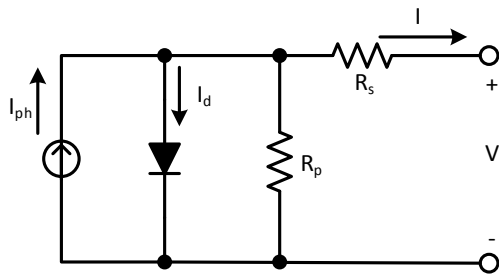
Nos últimos dois séculos, o consumo de energia tem crescido de forma expressiva. A agência americana EIA [1] projeta um crescimento do consumo mundial de energia de 56 % entre 2010 e 2040. Considerando que os recursos para produzir energia são limitados e que impactam o meio ambiente, este crescimento acelerado impõe desafios na busca de energias alternativas e constitui preocupação permanente dos organismos públicos e ambientais. A energia

solar fotovoltaica (PV, da denominação *Photovoltaic*) mostra-se, portanto, como fonte alternativa complementar promissora de produção de energia elétrica. Em projetos de conversão PV, a projeção dos custos do projeto e do desempenho dos sistemas fotovoltaicos dependem fortemente dos parâmetros elétricos dos módulos. Os resultados deste trabalho confirmam que o cálculo adequado desses parâmetros elétricos pode conduzir a valores sensivelmente distintos das informações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes quando o

módulo PV é exposto às condições ambientais (temperatura e velocidade de vento e nível de radiação incidente) distintas das condições padrão de referência. Este trabalho cumpre, portanto, este propósito, i.e.: calcular, com base nas especificações técnicas do módulo PV, a grandeza dos parâmetros elétricos para as condições de operação.

## 2. MODELAGEM DE UM MÓDULO PV

A representação de uma célula PV por meio de um circuito elétrico é, na grande maioria dos casos, feita seguindo um dos três modelos: o modelo simplificado [2], o modelo de um único diodo [3] e o modelo de dois diodos [4]. A discussão detalhada dessas alternativas é feita em recente pesquisa de mestrado em metrologia [5]. O modelo matemático utilizado para descrever uma célula PV neste trabalho foi baseado no modelo de um único diodo (figura 1).



**Figura 1.** Circuito equivalente de uma célula PV.

Neste modelo, a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico é representada por uma fonte de corrente  $I_{ph}$ , a corrente  $I_d$  no diodo que desempenha o papel da junção pn, que incorpora os efeitos da corrente de saturação reversa  $I_{sat}$  e o fator de idealidade  $n$ . As características elétricas de uma célula fotovoltaica na ausência de luz é similar à de um diodo convencional. Dentre outros efeitos (perdas) destacam-se as perdas internas pela corrente de fuga por caminhos alternativos na célula PV (representadas pela resistência paralela  $R_p$ ) e as perdas causadas por quedas de tensão nos contatos metálicos da célula (resistência em série

$R_s$ ). Então, a corrente  $I$  (gerada pela célula PV) pode ser expressa em função da tensão  $V$ :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{V+R_s I}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

A equação não linear (Eq. 1) acima apresenta uma relação tensão-corrente elétrica de natureza transcendental, cuja solução requer o uso de métodos numérico [3, 6, 7]. Os parâmetros da célula PV foram determinados pela função “fsolve” do Matlab, utilizada para solucionar sistemas de equações não lineares [8-10], que permitem obter os valores de  $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  e  $n$ .

A determinação das 5 incógnitas da equação (1) requer, obrigatoriamente, 5 equações independentes. As três primeiras equações são obtidas substituindo-se na equação (1) os seguintes dados normalmente disponibilizados pelo fabricante da célula PV: corrente de curto-circuito (2), tensão de circuito aberto (3) e ponto de potência máxima (4).

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{sat,ref} \left[ e^{\left( \frac{R_s,ref I_{sc,ref}}{n_{ref} V_{t,ref}} \right)} - 1 \right] - \frac{R_s,ref I_{sc,ref}}{R_p,ref} \quad (2)$$

$$I_{ph,ref} = I_{sat,ref} \left[ e^{\left( \frac{V_{oc,ref}}{n_{ref} V_{t,ref}} \right)} - 1 \right] + \frac{V_{oc,ref}}{R_p,ref} \quad (3)$$

$$I_{sat,ref} \left[ e^{\left( \frac{V_{mp,ref} + R_s,ref I_{mp,ref}}{n_{ref} V_{t,ref}} \right)} - 1 \right] + \frac{V_{mp,ref} + R_s,ref I_{mp,ref}}{R_p,ref} = I_{ph,ref} - I_{mp,ref} \quad (4)$$

A quarta equação é obtida considerando que a derivada da função potência em relação à tensão é nula no ponto de potência máxima (5).

$$\frac{\frac{I_{sat,ref}}{n_{ref} V_{t,ref}} e^{\left( \frac{V_{mp,ref} + R_s,ref I_{mp,ref}}{n_{ref} V_{t,ref}} \right)} + \frac{1}{R_p,ref}}{1 + \frac{I_{sat,ref} R_s,ref}{n_{ref} V_{t,ref}} e^{\left( \frac{V_{mp,ref} + R_s,ref I_{mp,ref}}{n_{ref} V_{t,ref}} \right)} + \frac{R_s,ref}{R_p,ref}} = \frac{I_{mp,ref}}{V_{mp,ref}} \quad (5)$$

A quinta e última equação pode ser obtida a partir da derivada da corrente em relação à tensão elétrica no ponto de curto-circuito (6).

$$\frac{\frac{I_{sat,ref}}{n_{ref}V_{t,ref}} e^{\left(\frac{R_{s,ref}I_{sc,ref}}{n_{ref}V_{t,ref}}\right)} + \frac{1}{R_{p,ref}}}{1 + \frac{I_{sat,ref}R_{s,ref}}{n_{ref}V_{t,ref}} e^{\left(\frac{R_{s,ref}I_{sc,ref}}{n_{ref}V_{t,ref}}\right)} + \frac{R_{s,ref}}{R_{p,ref}}} \approx \frac{1}{R_{p,ref}} \quad (6)$$

Com o propósito de criar um grau adicional de redundância, uma sexta equação foi gerada para assegurar maior confiabilidade na determinação do coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto ( $k_v$ ) pelo modelo [11-12].

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + k_v(T - T_{ref}) \quad (7)$$

Então, considerando (7) no (3), obtém-se que:

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left(\frac{V_{oc}}{nV_t}\right)} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (8)$$

Os resultados obtidos pelo método proposto (“simulação” na tabela 1) foram validados pela comparação dos parâmetros elétricos obtidos pela simulação realizada (que faz uso de parâmetros técnicos do fabricante do módulo PV) com (i) resultados de trabalhos consagrado na literatura [11, 12 e 13], e (ii) com resultados produzidos por dois simuladores comerciais (PVsyst e SAM), conforme documentado na tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros elétricos: comparação do método proposto com dados da literatura.

	$I_{ph}$	$I_{sat}$	$R_s$	$R_p$	$n$
ET Solar ET-M572190BB					
[11]	5,56	1,77E-09	0,50	524,66	1,11
PVsyst	5,18	2,50E-10	0,59	500,00	1,02
SAM	5,65	1,55E-10	0,46	162,60	0,99
<b>Simulação</b>	<b>5,56</b>	<b>1,78E-09</b>	<b>0,50</b>	<b>525,11</b>	<b>1,11</b>
Kyocera KC 175GHT-2					
[12]	8,11	1,10E-10	0,28	83,30	0,94
[13]	8,07	8,46E-11	0,25	125,46	0,94
PVsyst	8,09	4,00E-10	0,31	180,00	0,99
SAM	8,11	1,05E-09	0,25	95,69	1,04
<b>Simulação</b>	<b>8,10</b>	<b>8,11E-09</b>	<b>0,21</b>	<b>113,72</b>	<b>1,14</b>

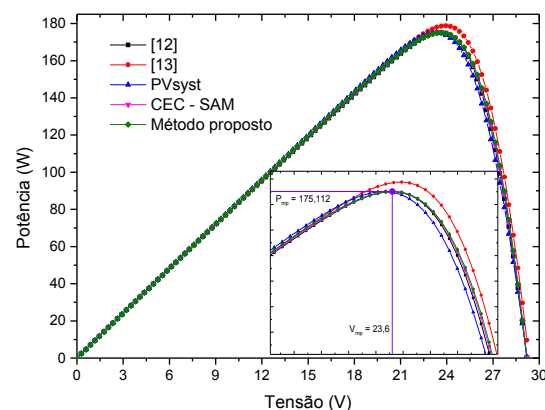
A partir dos valores calculados (simulação) dos parâmetros elétricos do módulo PV pode-se calcular a corrente e tensão do módulo PV. Para tal, fez-se uso da função de Lambert W, que permite o cálculo aparentemente explícito da corrente como uma função não-linear da tensão elétrica do módulo PV. A função de Lambert W não pode ser expressa em termos de funções elementares, mas pode ser eficientemente

resolvida fazendo uso de softwares comerciais (Matlab [14], Maple [15] e Mathematica [16]).

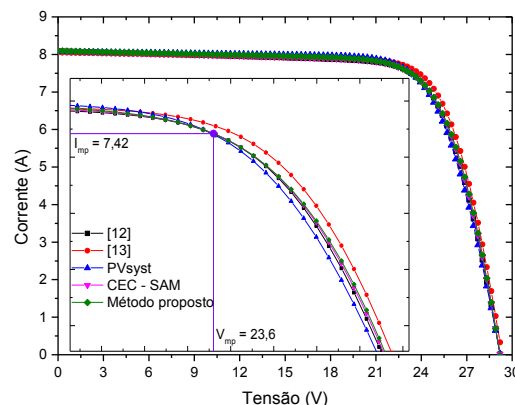
$$\theta = \frac{R_s R_p I_{sat}}{nV_t(R_p + R_s)} \exp \left[ \frac{R_s \left( I_{ph} R_p + I_{sat} R_p + \frac{R_p}{R_s} V \right)}{nV_t(R_p + R_s)} \right] \quad (9)$$

$$I(V) = \frac{R_p(I_{ph} + I_{sat}) - V}{R_p + R_s} - \frac{nV_t}{R_s} \text{LambertW}(\theta) \quad (10)$$

A partir dos parâmetros elétricos simulados foi possível construir as curvas características para o módulo PV (Kyocera, KC 175GHT-2), que reproduzem com excelente grau de concordância curvas similares obtidas a partir de métodos reportados na literatura (figuras 2 e 3).



**Figura 2.** Comparação: curva P-V via parâmetros elétricos simulados e dados da literatura [12,13].



**Figura 3.** Comparação: curva I-V via parâmetros elétricos simulados e dados da literatura [12,13].

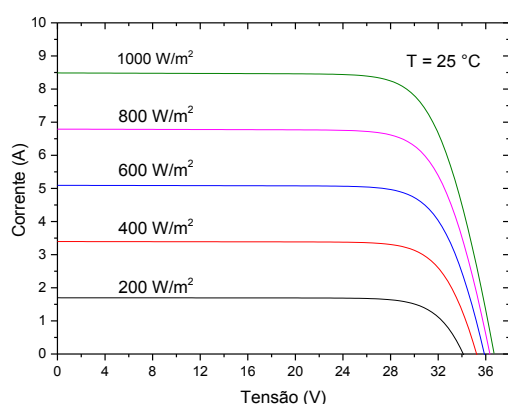
Em se tratando de comparação com outros resultados experimentais e com previsões por softwares comerciais, um indicação da confiabilidade da simulação realizada é dada pela raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre todos os resultados disponíveis pelas diferentes técnicas. A tabela 2 resume os cálculos desta

comparação (RMSE) para o caso do módulo PV (Kyocera KC 175GHT-2).

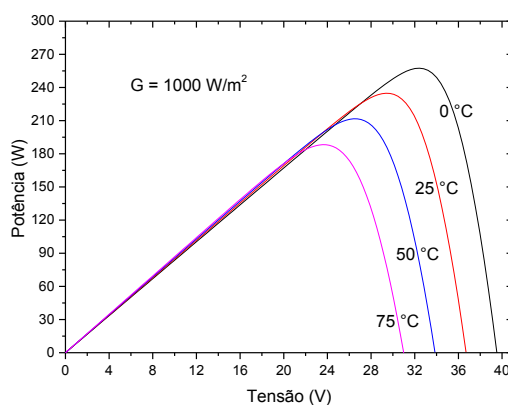
**Tabela 2.** Desempenho do método proposto.

	[12]	[13]	PV <sub>sys</sub>	SAM
RMSE	0,051	0,122	0,108	0,023

A corrente e a tensão associada à potência máxima do módulo PV dependem, em maior grau, da radiação solar e, em menor grau, da temperatura [10,11,14]. As curvas características I-V e P-V para diferentes níveis de radiação solar e diferentes temperaturas são mostradas, respectivamente, nas figuras 4 e 5.



**Figura 4.** Curva característica I-V para diferentes níveis de radiação (TPB156X156-60-P 235 W).



**Figura 5.** Curva característica P-V para diferentes temperaturas (TPB156X156-60-P 235 W).

### 3. CONCLUSÕES

Conforme confirmado pelos resultados reportados na tabela 1, o método proposto mostrou-se adequado para estimar os parâmetros elétricos do módulo PV, cujos resultados foram comparados com resultados de outros métodos documentados na literatura e dados produzidos

por softwares comerciais. Apesar da discrepância observada entre resultados simulados dos parâmetros elétricos constantes da tabela 1 quando estes são individualmente comparados com dados da literatura, é surpreendente esta concordância quando a comparação é feita em bloco. Em outras palavras, quando coletivamente todos os parâmetros elétricos são utilizados para construir as curvas características P-V e I-V (figuras 2 e 3) do módulo PV estas praticamente se superpõem às curvas construídas com base em dados consagrados na literatura especializada.

### REFERÊNCIAS

- [1] U.S. Energy Information Administration 2013 Technical report: DOE/EIA-0484
- [2] Weidong X, Dunford W G and Capel A 2004 *Power Electronics Specialists Conference* 3 1950
- [3] Kennerud K L 1969 *Aerospace and Electronic Systems AES-5* 912
- [4] Gow J A and Manning C D 1999 *Electric Power Applications* 146 193
- [5] Surichaqui R 2015 Dissertação (Mestrado em Metrologia) PUC-Rio
- [6] Charles J P, Abdelkrim M, Muoy Y H and Mialhe P 1981 *Solar Cells* 4 169
- [7] Enebish N, Agchbayar D, Dorjkhand S, Baatar D and Ylemj I 1993 *Solar Energy Materials and Solar Cells* 29 201
- [8] Alqahtani A H 2012 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* 1748
- [9] Tian H, Mancilla-David F, Ellis K, Muljadi E and Jenkins P 2012 *Solar Energy* 86 2695
- [10] Ding K, Zhang J, Bian X and Xu J 2014 *Solar Energy* 101 40
- [11] Tian H, Mancilla-David F, Ellis K, Muljadi E and Jenkins P 2012 *Solar Energy* 86 2695
- [12] Dobos A P 2012 *Journal of Solar Energy Engineering* 134 021011
- [13] Lo Brano V and Ciulla G 2013 *Applied Energy* 111 894
- [14] Orioli A and Di Gangi A 2013 *Applied Energy* 102 1160
- [15] Ghani F, Rosengarten G, Duke M and Carson J K 2014 *Renewable Energy* 72 105
- [16] Aazou S & Assaid E M 2009 *ICM/IEEE* 394
- [17] Yadir S, Aazou S, Maouhoub N, Rais K, Benhmida M and Assaid E 2009 *ACS/IEEE* 63