

Impacto do sombreamento parcial na conversão fotovoltaica: experimentos e simulação

Impact of partial shading on photovoltaic conversion: experiments and simulation

R C Surichaqui ¹, M N Frota ¹, E M Ticona ²

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

E-mail: mfrota@puc-rio.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto do sombreamento parcial que limita a radiação solar incidente sobre um módulo de conversão fotovoltaica de substrato policristalino. A comparação dos resultados da simulação numérica com resultados de medições experimentais de grandezas elétricas permitiu validar a eficácia do modelo proposto de um único diodo. Na máxima potência e condição de sombreamento parcial, o erro relativo (ER) da potência medida e simulada foi 4,2 %.

Palavras-chave: conversão fotovoltaica, sombreamento parcial, metrologia.

Abstract: The aim of this paper is to evaluate the impact of the partial shading that limits the incident solar radiation on a polycrystalline photovoltaic module. A comparison of the results of a numerical simulation with experimental measurements of electrical magnitudes allowed validating the effectiveness of a single diode model. At the maximum power and shading condition, the relative error (RE) of measured and simulated power was 4.2 %.

Keywords: photovoltaic conversion, partial shading, metrology.

1. INTRODUÇÃO

Não são raras as situações em que o engenheiro projetista se vê forçado a projetar a instalação de módulos fotovoltaicos (PV, da denominação *Photovoltaic*), em coberturas de edifícios, fachadas ou em ambientes urbanos expostos a efeitos adversos que comprometem a eficiência da conversão PV. Nesse contexto, o sombreamento parcial constitui um desses efeitos

adversos que limita de forma drástica a incidência da radiação solar sobre o módulo PV, a exemplo de sombras inevitáveis ocasionadas pela presença de edificações e árvores na adjacência de instalações, ou mesmo, indesejáveis depósitos de sujeira, nuvens que se interpõem à radiação. Este trabalho concentra-se no estudo do impacto causado pelo sombreamento parcial. Sob certas condições operacionais, uma célula PV exposta ao

sombreamento parcial dissipa potência elétrica podendo aquecer ao ponto de comprometer o próprio material do seu substrato [1], tal fenômeno é conhecido como “pontos quentes” [2]. Adicionalmente à perda de potência causada pelo sombreamento parcial no sistema PV, ocorrem perdas por dissociação ou descasamento no arranjo de células do módulo fotovoltaico, comumente denominado como “mismatch” (resulta, também, de diferenças no processo de fabricação, em que as células dos módulos não são necessariamente idênticas entre si [3]).

2. CARACTERÍSTICAS I-V DA CÉLULA

O comportamento elétrico de uma célula PV pode ser convenientemente representado pelo circuito equivalente conforme ilustrado na figura 1. Este circuito elétrico é denominado de modelo de um único diodo [4]. A discussão detalhada desta alternativa constituiu objeto de pesquisa recente dos autores [5].

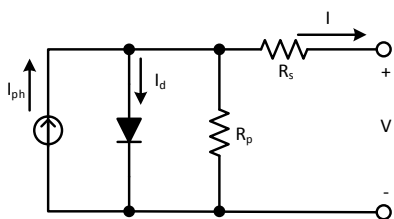


Figura 1. Circuito equivalente de uma célula PV.

O modelo de um único diodo de uma célula PV é representado por (1):

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

$$V_t = \frac{AkT}{q} \quad (2)$$

Nestas equações, I (A, ampère) denota a corrente elétrica; V (V, volt) a diferença de potencial; I_{ph} (A) a corrente induzida pelo efeito PV; I_{sat} (A) a corrente de saturação reversa do diodo; A o fator adimensional de idealidade do diodo; R_p (Ω) a resistência paralela; R_s (Ω) a resistência em série; k (J/K) a constante de Boltzmann; q (C, Coulomb) a carga do

elétron; n_s o número de células em série e T (K) a temperatura da célula PV.

Com base no método desenvolvido em [5], os parâmetros elétricos do módulo PV são calculados (para a condição-padrão de referência) a partir de especificações técnicas normalmente disponibilizadas pelo fabricante do módulo fotovoltaico. Os dados da tabela 1 comparam os resultados dos parâmetros do modelo de um diodo de um módulo PV (Sun Earth Solar Power, TPB156X156-60-P, 235 W, policristalino) com resultados obtidos no software comercial PVsyst e SAM.

Tabela 1. Parâmetros elétricos do módulo PV.

	I_{ph} (A)	I_{sat} (A)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	A
PVsyst	8,47	3,60E-10	0,32	350,00	0,99
SAM	8,56	2,18E-09	0,39	682,87	0,98
Simulação	8,49	1,12E-09	0,33	799,93	1,05

O impacto do sombreamento parcial em um módulo PV foi avaliado resolvendo numericamente o circuito elétrico mostrado na figura 2 em condições adversas específicas de operação.

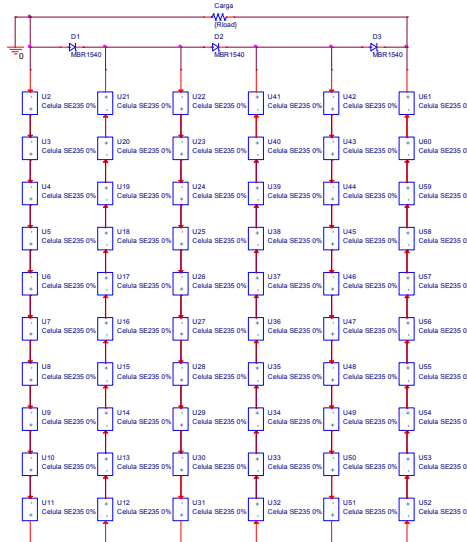


Figura 2. Arranjo elétrico de células de um módulo PV (OrCAD/PSpice).

3. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Em estrita conformidade com o protocolo de ensaios proposto pelo Departamento de Energia

dos Estados Unidos (DOE/USA) e homologado pelo seu Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) [6], experimentos foram realizados no Laboratório de Energias Alternativas da PUC-Rio, para diferentes níveis de sombreamento controlado fazendo uso de telas semipermeáveis à radiação solar.

A figura 3 ilustra o aparato experimental, que faz uso de instrumentos calibrados (piranômetro Eppley (PSP); transdutor Pt-1000, de fabricação Fronius e módulo PV Sun Earth Solar Power TPB156X156-60-P 235 W, policristalino). Medições de tensão e corrente elétrica nos bornes do módulo PV foram realizadas e monitoradas durante os experimentos, conforme descrito na seção subsequente.

A incerteza associada às medições de I (A) e V (V) foram estimadas pela propagação das incertezas associadas à instrumentação acima descrita, resultando nos seguintes valores de incerteza expandida: $u_V = \pm 0,11 \%$, $u_I = \pm 2,3 \%$ e $u_P = \pm 2,3 \%$ no ponto de máxima potência.

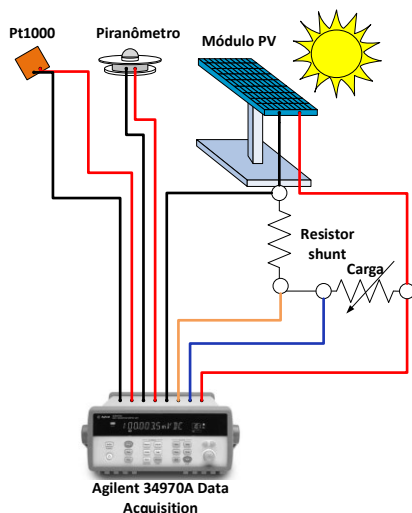


Figura 3. Aparatos experimental utilizado.

3.1. Medições na ausência de sombreamento

A curva característica do módulo PV foi construída, com base em medições de parâmetros elétricos controlados realizadas na ausência de exposição do módulo PV ao sombreamento. Resultados dessas medições realizadas em dia de

céu limpo sem nuvens (dezembro/2014) são mostrados nas figuras 4 e 5, para duas condições de temperatura do módulo PV e de radiação solar incidente e para diferentes valores da resistência de carga.

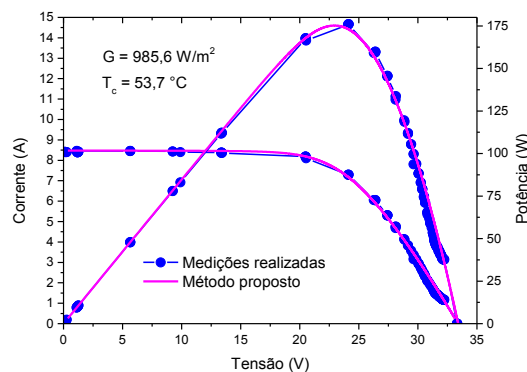


Figura 4. Curva I-V e P-V, sem sombreamento.

Em ambos os casos, as resistências (30Ω e 20Ω , respectivamente) foram impostas para viabilizar o fluxo de corrente entre os bornes do módulo PV durante o intervalo de tempo dos experimentos, que não excedeu 5 min. Para efeito dos cálculos, foram considerados valores médios medidos da radiação solar incidente e da temperatura do módulo PV nesse curto intervalo de tempo.

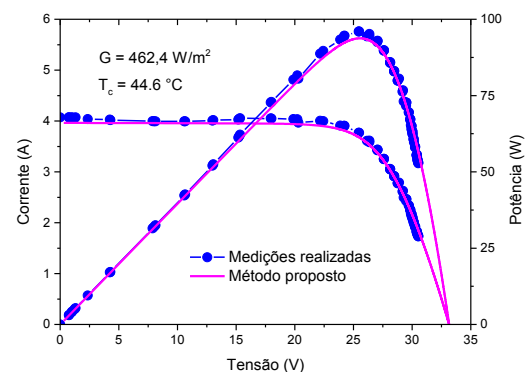


Figura 5. Curva I-V e P-V, sem sombreamento.

3.2. Medições na presença de sombreamento

Similarmente às medições reportadas na ausência de sombreamento, experimentos foram repetidos expondo o módulo PV a um sombreamento parcial controlado induzido pelas telas-filtro utilizadas [6]. A figura 6 ilustra a montagem do experimento realizado na presença de

sombreamento parcial (malha semi-transparente com fator 0,75 % de sombreamento), para uma situação em que apenas 33 % do módulo PV foi exposto à radiação solar incidente.



Figura 6. Experimentos com sombreamento.

A figura 7 mostra a curva característica do módulo PV, construída com base em resultados de medições realizadas quando este foi exposto a sombreamento parcial (dados coletados dia 10/ dezembro/2014), durante o intervalo de tempo entre 12:18:43:480 e 12:22:25:218. Os valores reportados da radiação solar incidente e da temperatura do módulo fotovoltaica referem-se a valores médios medidos nesse intervalo de tempo, para uma carga máxima imposta de 20 Ω .

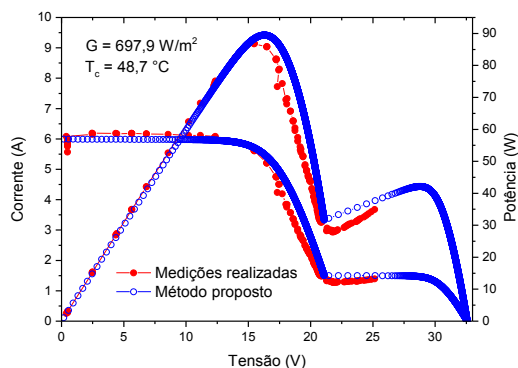


Figura 7. Curvas características I-V e P-V, com exposição a sombreamento parcial.

4. CONCLUSÕES

A comparação entre os resultados de corrente e tensão elétrica determinados de forma independente, quer pela simulação numérica, quer pelas medições realizadas, permite concluir

que a modelagem por um único diodo constitui-se em alternativa prática para simular os parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico. É com base nesses parâmetros que se consegue calcular os valores de corrente e tensão requeridos para a construção das curvas características quando o módulo fotovoltaico é submetido a sombreamento parcial. Conforme mostrado na figura 7, a simulação não apenas reproduz os dados experimentais para diferentes condições como, também, a forma das curvas características I-V e P-V, drasticamente afetadas pela condição de sombreamento parcial.

A qualidade da comparação da simulação P_{cal} (W, watt) pelo modelo de um único diodo com os resultados das medições de I_{exp} (A) e V_{exp} (V) realizadas foi comprovada pelo RMSE (Raiz média quadrática do erro) entre os N resultados obtidos, calculados pela equação (3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,exp} - P_{i,cal})^2} \quad (3)$$

Os valores de RMSE (W) foram de 5,5; 1,87 e 8,62 que correspondem às figuras (4), (5) e (7) respectivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] Silvestre S and Chouder A 2008 *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **16** 141
- [2] Molenbroek E, Waddington D W and Emery K A 1991 *PV Specialists Conference* **1** 547
- [3] Wilson K, De Ceuster D and Sinton R A 2006 *4th World Conf. on PV Energy Conversion* **1** 916
- [4] Kennerud K L 1969 *Aerospace and Electronic Systems* **AES-5** 912
- [5] Surichaqui R 2015 Dissertação (Mestrado em Metrologia) PUC-Rio
- [6] Deline C, Meydbray J, Donovan M and Forrest J 2012 *National Renewable Energy Laboratory* **303** 275