

ANÁLISE DE DESEMPENHO E ATUAÇÃO DE DIODOS DE BYPASS EM UM MÓDULO FOTOVOLTAICO COMERCIAL

Josiane Peroza – josi_peroza@hotmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade

Resumo. O desempenho de um sistema fotovoltaico depende de vários fatores, como a disponibilidade de radiação solar e sua distribuição espectral, temperatura do módulo fotovoltaico, sujidade, perdas de cabeamento, etc. Um dos fatores que afeta a potência da matriz fotovoltaica é a perda por mismatch devido às diferenças entre cada célula que compõe o módulo, sendo que as características das células dependem de processos de fabricação, os quais resultam em certa variabilidade nos parâmetros da curva I-V. Um procedimento que auxiliou na melhoria de eficiência e geração de potência de módulos fotovoltaicos diz respeito a utilização de diodos de bypass, caracterizados como diodos de proteção contra os efeitos de mismatch e sombreamento. Este trabalho apresenta uma análise da influência e atuação de diodos de bypass no desempenho de um módulo fotovoltaico comercial, a fim de verificar a diferenciação das características elétricas das células individuais, como também a interferência causada na potência produzida. Os ensaios foram realizados com o auxílio de um simulador solar para determinação das curvas I-V com o bloqueio de irradiância de cada célula que compõe o módulo fotovoltaico. Os resultados obtidos indicam que os parâmetros elétricos são muito similares com a proteção dos diodos, sendo que a potência produzida não sofre variações relevantes com o sombreamento de uma célula aleatória em relação à outra, com uma diferença percentual encontrada de no máximo 0,65% entre duas células. Os parâmetros de resistência série e resistência shunt também foram analisados, apresentando os maiores percentuais de diferença entre as células fotovoltaicas, sendo observado que a aquisição destes parâmetros por cálculo do simulador solar não está adequada às condições de ensaio aplicadas.

Palavras-chave: mismatch, sombreamento, diodos de bypass.

1. INTRODUÇÃO

O mercado de energia solar fotovoltaica encontra-se em expansão. Esta fonte de energia apresenta-se como uma alternativa promissora para inserção de energias renováveis na matriz elétrica. Dentre suas vantagens destacam-se a tecnologia bem difundida e conhecida, que proporciona confiabilidade, além da redução de custos de produção, o que vem possibilitando maior contribuição na geração descentralizada.

Em relação à geração distribuída, no Brasil o número de conexões de micro e minigeração de energia superou 20 mil instalações, sendo que a fonte mais utilizada pelos consumidores-geradores em quase sua totalidade diz respeito a energia solar fotovoltaica, ultrapassando 175 MW de potência instalada desta fonte (ANEEL, 2017).

Nesse contexto, o conhecimento de como um módulo fotovoltaico funciona e sua potência é entregue à rede de energia elétrica se faz de grande importância. A caracterização é um processo importante de avaliação do desempenho elétrico do dispositivo fotovoltaico, sendo a determinação da curva I-V o ensaio de maior relevância.

O desempenho de um sistema fotovoltaico depende de vários fatores, como a disponibilidade de radiação solar e sua distribuição espectral, temperatura do módulo fotovoltaico, sujidade, perdas de cabeamento, degradação temporal do módulo fotovoltaico, etc. Um dos fatores que afetam a potência da matriz fotovoltaica é a perda por descasamento (*mismatch*) devido às diferenças entre cada célula que compõe o módulo, sendo que as características das células dependem de processos de fabricação, os quais resultam em certa variabilidade nos parâmetros da curva I-V. A tecnologia de fabricação de módulos fotovoltaicos melhorou consideravelmente, resultando em uma maior eficiência e melhor processo de controle de qualidade, o que possibilitou uma menor tolerância de potência máxima de módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado (Gasparin *et al.*, 2016).

Diversos autores estudaram os efeitos do *mismatch* e analisaram a interferência da configuração de células e módulos (Bucciarelli, 1979; Bishop, 1988; Chamberlin *et al.*, 1995; Forniés *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2014).

Referente ao efeito de sombreamento de um módulo, Silvestre e Chouder (2008) realizaram estudos sombreando somente uma célula de um módulo com 36 células associadas em série. Através do modelo de equação proposto por Bishop (1988) analisaram os efeitos de diferentes níveis de sombreamento no desempenho de módulos fotovoltaicos através de simulações computacionais, em que foi observada uma redução da potência do módulo de 29,64% quando uma célula é totalmente sombreada.

Um dos procedimentos que auxiliou na melhoria de eficiência e geração de potência de módulos fotovoltaicos diz respeito a utilização de diodos de desvio (*bypass*), caracterizados como diodos de proteção contra os efeitos de *mismatch* e sombreamento. Conectando-se em anti-paralelo com os extremos da célula um diodo de *bypass*, o mesmo encontra-se diretamente polarizado, permitindo que por ele circule corrente. Desta forma, quando sombreada, a célula

em questão não produz energia elétrica, mas também não se comporta como uma carga para as demais células da conexão. Se a célula for idêntica às demais e não estiver sombreada, o diodo de *bypass* encontra-se reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente. Este diodo de *bypass* deve ser capaz de conduzir toda a corrente gerada pela associação série e sua tensão limiar de condução deve ser a menor possível (Hecktheuer, 2001). Usualmente, os diodos de *bypass* são conectados em anti-paralelo a conjuntos de células. Existem alguns estudos que abordam a configuração de diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos a fim de analisar os efeitos de sombreamento, *mismatch* e *hot spot* (Hecktheuer; Krenzinger, 2000; Silvestre; Boronat; Chouder, 2009; Daliento *et al.*, 2016).

Os efeitos de *mismatch* das células e sombreamento podem ser analisados através da caracterização do respectivo módulo fotovoltaico. A curva característica I-V de um módulo nas condições padrão de teste (*Standart Test Conditions* – STC), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m², distribuição espectral correspondente a AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C, determinam parâmetros elétricos tais como corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), potência máxima (P_{máx}), tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}) e corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}). A curva I-V também proporciona informações sobre o funcionamento do diodo, a corrente de saturação reversa, a resistência série e a resistência *shunt* (Crozier; Van Dyk; Vorster, 2011).

A resistência série contribui para reduzir a corrente de curto circuito, não afetando a tensão de circuito aberto. Para valores elevados de resistência série perde-se a curvatura do diodo tornando-se uma reta. Por outro lado, a resistência *shunt* ou resistência em paralelo (R_p), reduz a tensão de circuito aberto sem danificar a corrente de curto circuito. Esta é causada por impurezas e defeitos na estrutura, principalmente às bordas, que produzem um caminho interno para uma corrente de fuga. Baixos valores de resistência paralela tornam a curva do diodo em uma reta (Pinho; Galdino, 2014). Em Silvestre e Chouder (2008) foi analisada a relação entre a potência dissipada com as resistências série e resistência em paralelo na redução da potência de saída devido ao sombreamento, sendo observados percentuais de 50% ou mais na diminuição da potência total do módulo fotovoltaico em razão da resistência paralelo.

Em vista disso, este trabalho apresenta uma análise da influência e atuação de diodos de *bypass* no desempenho de um módulo fotovoltaico comercial, a fim de verificar a diferenciação das características elétricas das células individuais, como também a interferência causada na potência produzida. Os ensaios foram realizados com o auxílio de um simulador solar para determinação das curvas I-V com o bloqueio de irradiância de cada célula do módulo, analisando a atuação dos diodos de *bypass*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização elétrica do módulo fotovoltaico de ensaio foi realizada através de um simulador solar no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizado na cidade de Porto Alegre. Um simulador solar consiste em um aparato com lâmpadas especiais fabricadas para emular as propriedades da radiação solar, a fim de ser possível a realização de ensaios com dispositivos fotovoltaicos.

O simulador solar utilizado neste trabalho corresponde ao modelo SunSim 3C, fabricado pela empresa suíça PASAN. Este possui dimensões de iluminação de 2,0 x 2,0 m, área suficiente para a grande maioria de módulos existentes no mercado. Caracteriza-se pela utilização de iluminação pulsada, com duração de pulso de luz com 10 ms, possuindo características espectrais, espaciais e temporais, excedendo a classificação AAA da norma IEC 60904-9, sendo classificado como A+A+A+, como indica a Tab. 1. Maiores informações sobre este simulador solar SunSim 3C podem ser encontrados em Dalmagro e Krenzinger (2013) e Peroza *et al.* (2015), sendo que em Hincapie *et al.* (2014) está descrito de forma detalhada a montagem deste simulador solar no laboratório. Em Souza *et al.* (2012) encontram-se expostos os motivos que levaram a escolha de compra deste simulador em questão.

Tabela 1. Classificação do modelo SunSim 3C de acordo com a IEC 60904-9. Fonte: (Costa; Defferrari; Krenzinger, 2016).

NORMA	Classe AAA	Classe A+A+A+
C.Não uniformidade espacial	≤ 2%	≤ 1%
Instabilidade temporal (LTI)	≤ 2%	≤ 1%
Casamento espectral	≤ ± 25%	≤ ± 12,5%

Como o intuito do trabalho é avaliar a análise da influência e atuação de diodos de *bypass* através do ensaio de 60 células fotovoltaicas com bloqueio de irradiância, os parâmetros elétricos tornam-se importante forma de avaliação. Isso envolve principalmente a calibração da célula de referência e do sensor de temperatura, o que pode acarretar incertezas. De forma a determinar a incerteza relativa de medições, a repetibilidade é um fator essencial a ser determinado. Gasparin *et al.* (2016) realizaram uma análise estatística de parâmetros da curva I-V de 105 módulos fotovoltaicos, de tecnologia multicristalina e potência nominal de 265 W, com características nominais idênticas, a fim de propor uma função descritiva da amostragem. Para isso foi necessário uma avaliação da repetibilidade de ensaio através do simulador solar SunSim 3C. A repetibilidade foi determinada através da medição de 26 vezes consecutivas de um módulo fotovoltaico em estado de equilíbrio térmico com o ambiente, mantendo a variação de temperatura menor que 0,1°C. A temperatura foi medida por um Pt100 fixado na parte de trás do módulo, em um intervalo de 20 min. Os valores encontrados para esses testes são detalhados na Tab. 2. Desta forma, para este trabalho foi considerado que as

incertezas de repetibilidade configuram-se próximas ao apresentado por Gasparin *et al.* (2016), por se tratar de mesma metodologia de ensaio, com o uso do mesmo simulador solar, porém com exceção do sombreamento de cada célula. De acordo com a Tab. 2, conclui-se a alta eficácia de repetibilidade do simulador solar utilizado, sendo um bom aparato para o experimento vigente.

Tabela 2. Resultados de 26 curvas I-V medidas consecutivamente de um único módulo fotovoltaico e as suas correspondentes incertezas em condições de repetibilidade. Fonte: (Gasparin *et al.*, 2016).

	P _{máx} (W)	I _{mp} (A)	I _{sc} (A)	V _{mp} (V)	V _{oc} (V)
Média	248,83	8,4017	9,0374	29,616	37,560
Desvio	0,051526	0,002074	0,001651	0,008501	0,00979
Incerteza expandida	0,04%	0,05%	0,04%	0,06%	0,05%

Os ensaios de medição foram realizados com a irradiância de 1000 W/m², mantendo a temperatura de célula em 25°C, com variação de 0,2°C em alguns ensaios individuais das células. Em relação ao módulo fotovoltaico, para a determinação de desempenho dos diodos de *bypass* foi escolhido um módulo comercial, com 60 células associadas em série, de tecnologia de silício multicristalino, totalizando 265 W de acordo com a etiqueta do fabricante, e dimensões de 0,991x1,65 m, incluindo a moldura. As células foram analisadas de acordo com a numeração demonstrada na Fig. 1.

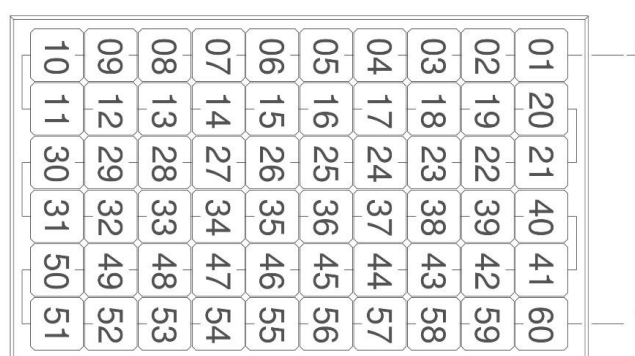


Figura 1 - Módulo fotovoltaico e sequência numérica adotada para as células fotovoltaicas.

Considerando a presença de 3 diodos de *bypass* no módulo de ensaio, a distribuição adotada corresponde ao modelo apresentado em Daliento *et al.* (2016), conforme Fig. 2. Este modelo caracteriza-se como o arranjo típico de um módulo de 60 células fotovoltaicas, onde um diodo de *bypass* é colocado em anti-paralelo a cada conjunto de 20 células, sem sobreposição de diodos. No modelo aqui adotado, o primeiro diodo atinge as células 1 a 20, o segundo diodo protege as células 21 a 40, sendo que o terceiro diodo *bypass* conecta-se as células 41 a 60, conforme numeração indicada na Fig. 1.

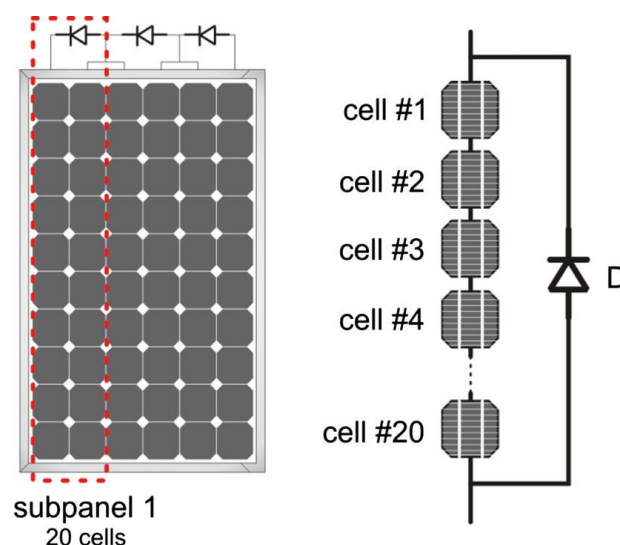


Figura 2 - Arranjo do módulo fotovoltaico em relação a presença de diodos de *bypass*. Fonte: (Daliento *et al.*, 2016)

Como método de análise, foram realizados diversos ensaios com cada uma das 60 células que compunham o módulo, sendo submetida a um bloqueio total de irradiância nas condições padrão de teste, a fim de se analisar

estatisticamente o desempenho e atuação dos diodos de *bypass*. Primeiramente obteve-se a curva I-V do módulo completo com a presença dos três diodos de *bypass* sem sombreamento. Os valores adquiridos com este ensaio correspondem a 262,87 W de potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), 9,15 A de corrente de curto-circuito (I_{sc}), 37,842 V de tensão de circuito aberto (V_{oc}), 8,60 A de corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}) e 30,56 V de tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}). Os valores de resistência s\u00e9rie e paralelo foram 0,483 Ω e 663,05 Ω , respectivamente.

Posteriormente, o procedimento adotado foi bloquear a incid\u00eancia de irradi\u00e2ncia, c\u00e9lula a c\u00e9lula, utilizando papel pl\u00e1stico preto e fita isolante como apresenta a Fig. 3, em que a c\u00e9lula 4 encontra-se bloqueada. A transmissividade atrav\u00e9s da c\u00e9lula sombreada pode ser considerada praticamente nula.



Figura 3 - M\u00f3dulo fotovoltaico com a c\u00e9lula 4 sombreada.

Em vista deste bloqueio de irradi\u00e2ncia individual, foram obtidas 60 curvas I-V, correspondente a cada c\u00e9lula totalmente sombreada. A Fig. 4 apresenta a curva I-V padr\u00e3o com a c\u00e9lula 4 sombreada, indicando a influ\u00eancia de prote\u00e7\u00e3o do diodo *bypass*, em compara\u00e7\u00e3o com a curva I-V do m\u00f3dulo sem influ\u00eancia de sombreamento.

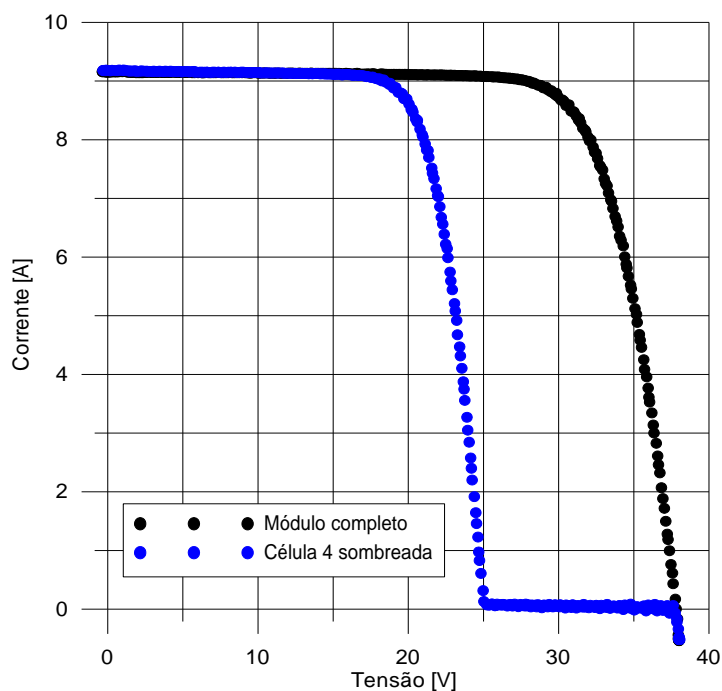


Figura 4 - Compara\u00e7\u00e3o das curvas I-V do m\u00f3dulo completo em rela\u00e7\u00e3o a c\u00e9lula 4 sombreada com influ\u00eancia do diodo de *bypass*.

Com a c\u00e9lula 4 atuando com bloqueio de luz foram obtidos os valores de 172,36 W de potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), 37,75 V de tensão de circuito aberto (V_{oc}), 20,04 V tensão de máxima potência (V_{mp}), com 9,18 de corrente de curto circuito (I_{sc}) e 8,60 de corrente de máxima potência (I_{mp}). Com tais valores, foi observada uma diferen\u00e7a de 34,43% em rela\u00e7\u00e3o \u00e0 potência máxima obtida com o m\u00f3dulo sem sombreamento. Esse resultado est\u00e1 similar ao apresentado por Silvestre e Chouder (2008), que analisa a rela\u00e7\u00e3o da pot\u00eancia gerada devido ao sombreamento, sendo observada uma redu\u00e7\u00e3o de aproximadamente 30% de energia quando uma \u00fanica c\u00e9lula de um m\u00f3dulo foi sombreada.

A partir dos par\u00e2metros el\u00e9tricos adquiridos com as respectivas curvas I-V, incluindo pot\u00eancia gerada, resist\u00eancia s\u00e9rie e shunt, foram analisadas as m\u00e9dias de cada par\u00e2metro e desvios padr\u00e3o de acordo com cada um dos tr\u00eas diodos *bypass* presentes no m\u00f3dulo fotovoltaico.

3. RESULTADOS

A análise de desempenho e atuação dos diodos *bypass* no módulo fotovoltaico de ensaio foi realizada com a obtenção da curva I-V para cada uma das 60 células com bloqueio de luz. Com isso, foram obtidos os valores de potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), tensão de circuito aberto (V_{oc}), tensão de máxima potência (V_{mp}), corrente de curto circuito (I_{sc}), corrente de máxima potência (I_{mp}), resistência série (R_s) e resistência shunt (R_p). As Figs. 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 mostram esses resultados obtidos, respectivamente, sendo a linha vermelha a média dos valores encontrados. Cabe salientar que os valores das resistências série e shunt foram obtidos diretamente por um cálculo efetuado pelo próprio software de ensaio do simulador Solar SunSim 3C. A resistência em série é calculada pelo software baseando-se no inverso da inclinação da curva I-V na região Voc, sendo que o fator de correção da curva foi negligenciado uma vez que a variação de temperatura é muito baixa e valores próximos a zero dificultam sua correção.

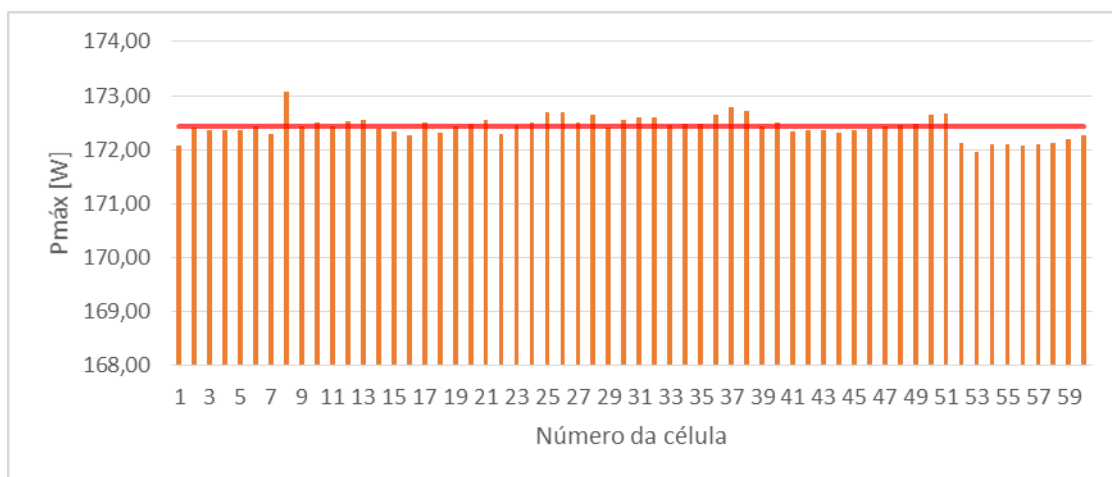


Figura 5 - Potência máxima obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

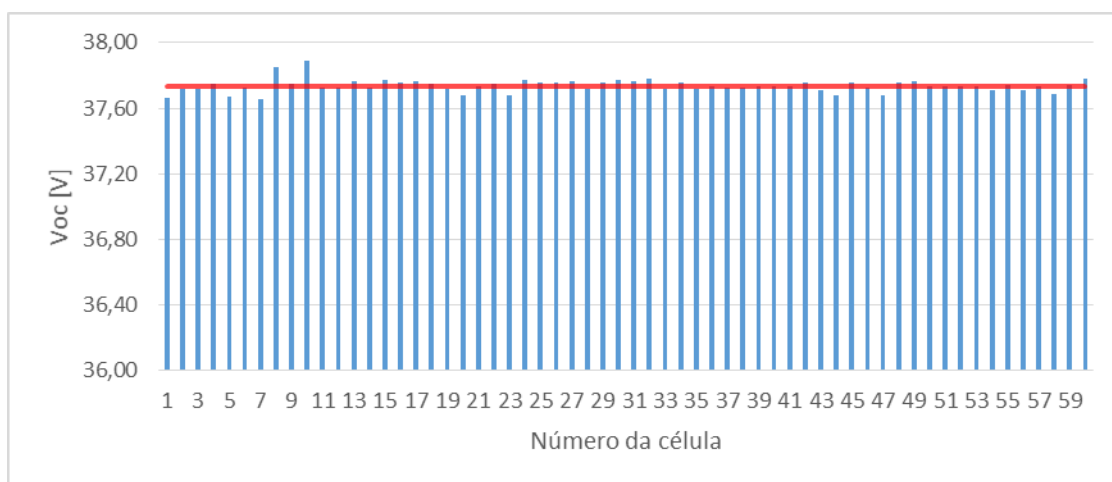


Figura 6 - Tensão de circuito aberto obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

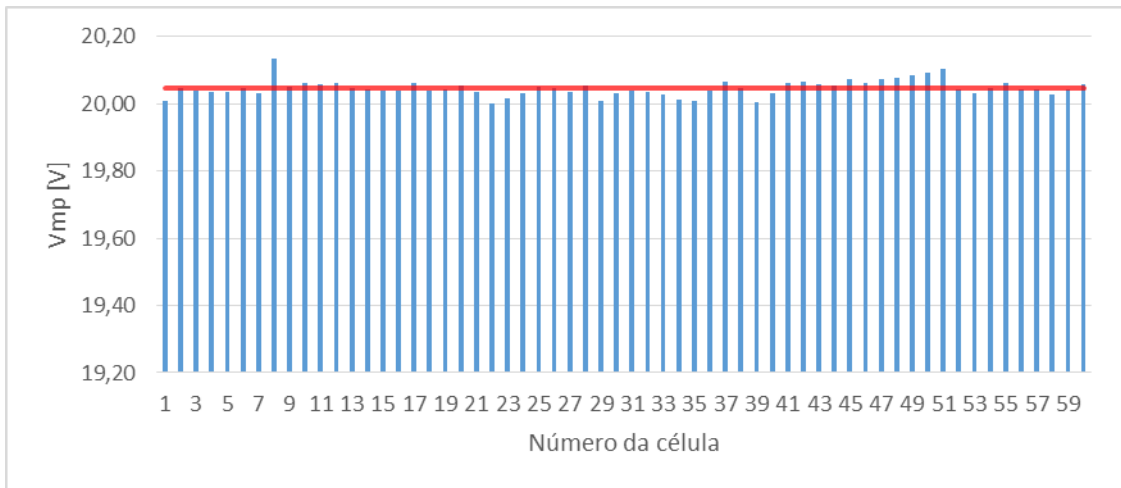


Figura 7 - Tensão de máxima potência obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

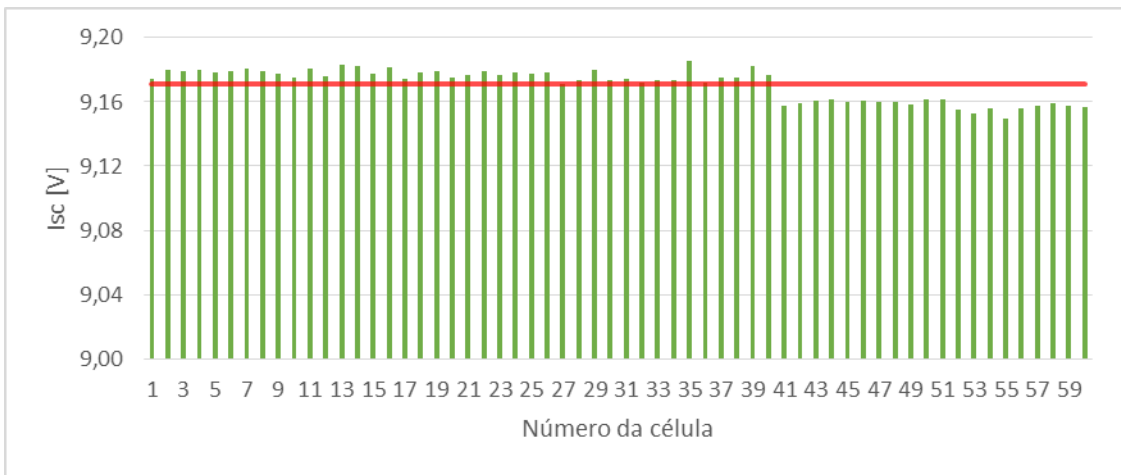


Figura 8 - Corrente de curto circuito obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

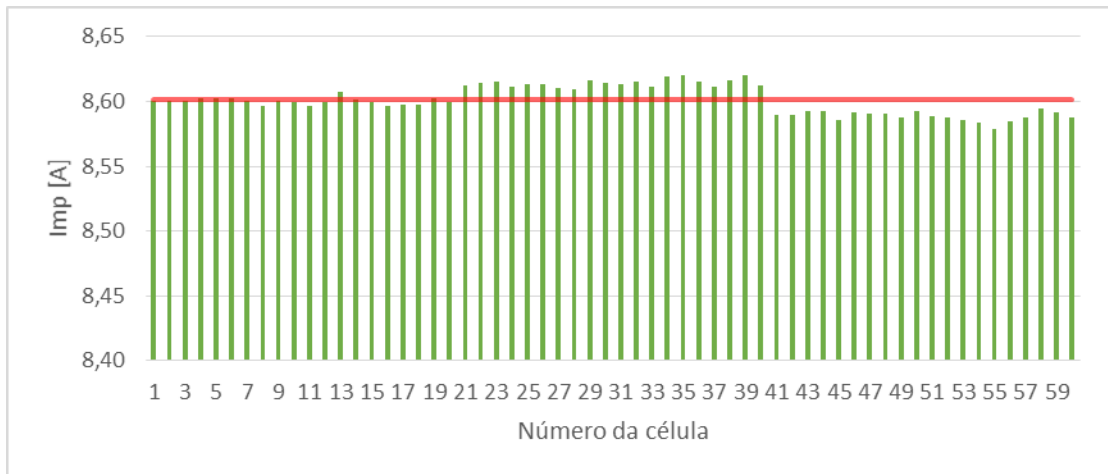


Figura 9 - Corrente de máxima potência obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

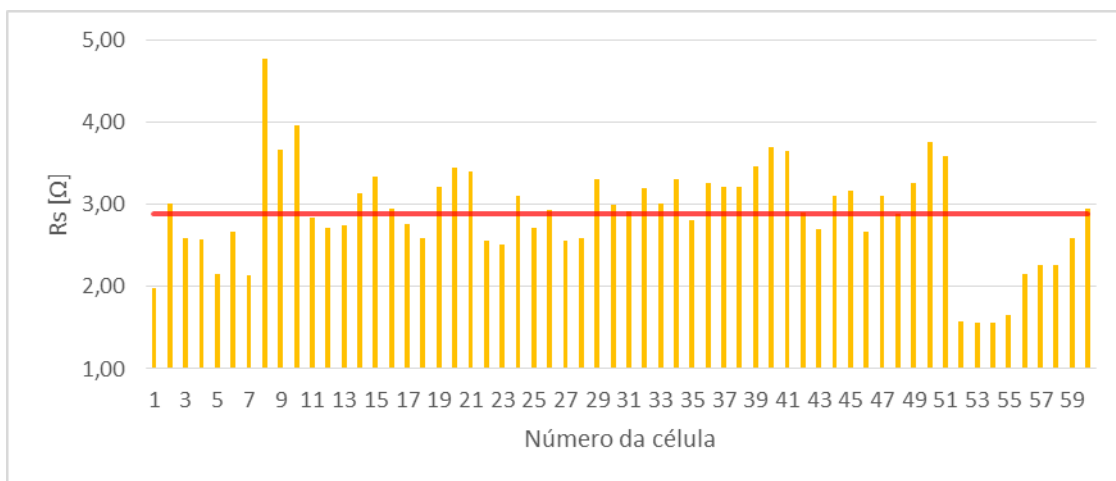


Figura 10 - Resistência série obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

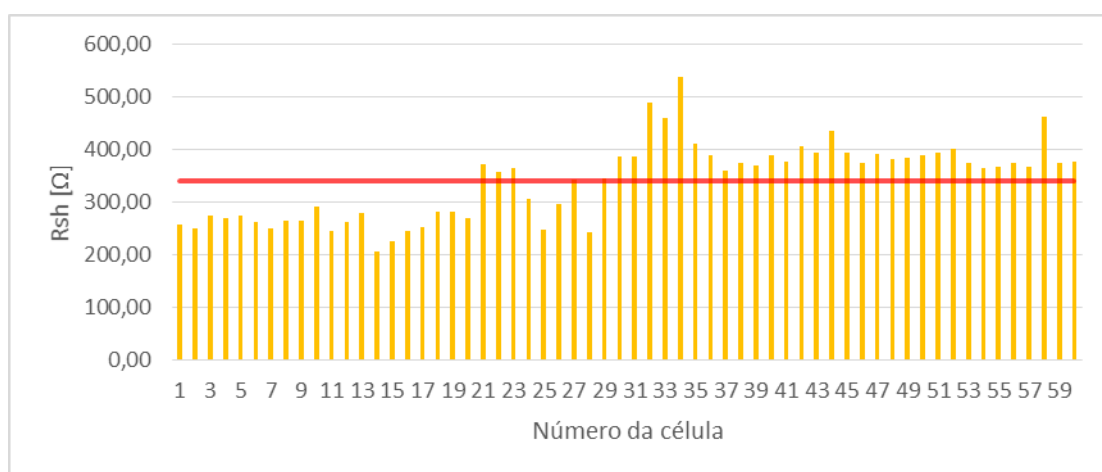


Figura 11 - Resistência shunt obtida com cada célula sombreada e atuação do diodo *bypass*.

As Figs. 5 a 11 relatam os resultados das 60 células, lembrando que a cada conjunto de 20 células existe a atuação de um diodo de *bypass* diferente. Através da Fig. 5, que apresenta os valores obtidos de potência máxima, com média de 172,42 W, observa-se que não existe um padrão entre os 3 diodos, sendo que não há grandes variações entre os valores obtidos. A maior diferença não ultrapassa 1,12 W entre a célula 8 e 53, pertencentes a atuação de dois diodos *bypass* diferentes, determinando um percentual de 0,65% de diferença de potência gerada.

Quanto às tensões de circuito aberto e de máxima potência, Figuras 6 e 7, estas não apresentaram grandes variações de valores, sendo 0,2 V para a tensão de circuito aberto entre as células 6 e 7 associadas ao mesmo diodo *bypass*, e 0,10 V de tensão de máxima potência entre as células 22 e 51. Percentualmente as maiores diferenças entre a tensão de circuito aberto e tensão no ponto de máxima potência foram em torno de 0,53% e 0,52%, respectivamente, demonstrando percentuais praticamente iguais, mesmo com células diferentes e sofrendo atuação de diodos *bypass* distintos.

Em relação à corrente de curto circuito e à corrente de máxima potência, Figuras 8 e 9, percebe-se um perfil de menores valores de corrente de acordo com o terceiro conjunto de células, das células 41 a 60, com atuação do terceiro diodo *bypass*, apesar da diferença desses valores não ser tão relevante. Não ultrapassando 0,4% de diferença de corrente de circuito aberto entre a célula 13 e 55 e 0,5% entre as células 35 e 55 na tensão no ponto de máxima potência.

Quanto às resistências série e shunt, Fig. 10 e 11, estas foram as que mais apresentaram variações. Para a curva I-V do módulo sem interferência de sombreamento, foram obtidos valores 0,483 Ω e 663 Ω para a resistência série e paralelo. Quando ensaiadas células com bloqueio de luz, observou-se que com a célula 8 sombreada foi encontrado o maior valor de resistência série, a qual apresentou uma reta na atuação da curva I-V do diodo. A Fig. 12 retrata a diferença da curva I-V entre a célula 8 sombreada em comparação a célula 4, detalhando o efeito do elevado valor de resistência série. Percentualmente a diferença entre a resistência série alcançou impressionantes 67% entre as células 8 e 52, com valores de 4,48 Ω e 1,47 Ω . Em relação à resistência shunt, o último conjunto de células (41 a 60) mostrou possuir maior equilíbrio nos valores obtidos, porém a diferença percentual atingiu 62% entre as células 14 e 34, com valores de 205 Ω e 539 Ω , pertencentes a atuações distintas dos diodos *bypass*. Tais resultados fornecem uma ideia de como a variação da forma da curva I-V devido ao sombreamento afeta o algoritmo de cálculo de R_s e R_p . O que se

pode constatar, através disso, é que não é possível afirmar que os valores de R_s e R_p calculados pelo simulador, em cada um dos 60 casos analisados, são de fato os valores reais das células no módulo, com as células atuando com bloqueio de irradiação. O que o simulador apresenta é o resultado de um algoritmo de cálculo para R_s e R_p que pode, perfeitamente, não ser adequado para células sombreadas e com atuação de diodos de *bypass*. O software de cálculo destes parâmetros é otimizado para a curva I-V completa de um módulo fotovoltaico sem sombreamento.

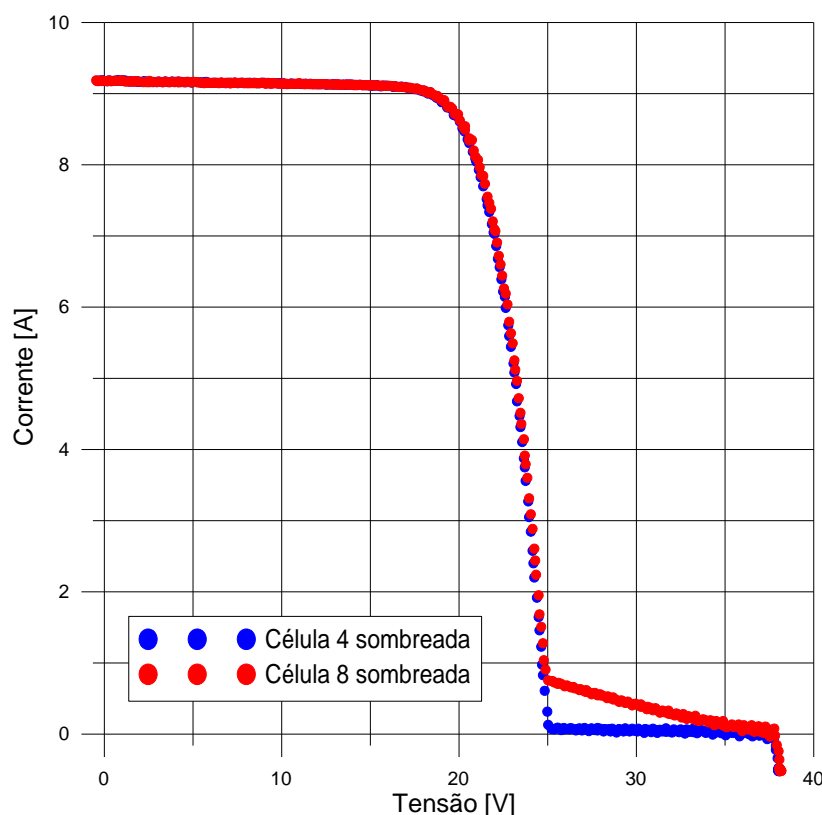


Figura 12 – Comparação das curvas I-V das células 4 e 8.

De forma mais quantitativa, os resultados apresentados em figuras podem ser mais detalhados em valores médios e desvios padrão de acordo com as Tabs. 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Valores médios dos parâmetros obtidos com a curva I-V em relação a cada conjunto de células com a presença de um diodo *bypass* e sombreamento.

	Pmáx [W]	Voc [V]	Vmp [V]	Isc [A]	Imp [A]	R_s [Ω]	R_p [Ω]
Todas as células	172,42	37,74	20,05	9,17	8,60	2,88	341
Diodo 1 (1 a 20)	172,43	37,71	20,05	9,18	8,60	2,97	261
Diodo 2 (21 a 40)	172,55	37,74	20,03	9,18	8,61	3,04	372
Diodo 3 (41 a 60)	172,29	37,73	20,06	9,16	8,59	2,62	390

Tabela 4 - Desvios padrão dos parâmetros obtidos com a curva I-V em relação a cada conjunto de células com a presença de um diodo *bypass* e sombreamento.

	Pmáx [W]	Voc [V]	Vmp [V]	Isc [A]	Imp [A]	R_s [Ω]	R_p [Ω]
Todas as células	0,199	0,039	0,024	0,010	0,011	0,603	72,5
Diodo 1 (1 a 20)	0,189	0,121	0,023	0,003	0,003	0,660	20,1
Diodo 2 (21 a 40)	0,125	0,025	0,018	0,004	0,003	0,340	70,9
Diodo 3 (41 a 60)	0,192	0,028	0,020	0,003	0,004	0,776	23,9

Conforme os valores médios apresentados na Tab. 3 é possível verificar que os valores obtidos para cada conjunto de célula associado a um diodo são muito próximos em quase todos os parâmetros analisados. Tanto a potência, como

os parâmetros elétricos de corrente e tensão apresentaram o mesmo valor, ao menos, nos dois primeiros algoritmos significativos, o que pode retratar a igualdade e uniformidade dos resultados. As maiores diferenças entre os valores médios são identificadas quanto às resistências série e shunt, conforme foram apresentados os valores nas Figs. 10 e 11.

A Tab. 4 confirma com baixos valores de desvios padrão a aproximação dos parâmetros elétricos analisados. Quanto às características do material, representadas pelas resistências série e shunt, estas apresentaram os maiores desvios, já sendo comentado o quanto esse resultado demonstra a indeterminação do uso do cálculo do software como ferramenta de análise para tais características, em decorrência do método de ensaio aplicado, com sombreamento e diodos de *bypass*.

4. CONCLUSÃO

Com a inserção crescente de energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, englobando a geração distribuída, dispositivos fotovoltaicos devem apresentar-se cada vez mais com tecnologia segura ao mercado para que ocorra maior investimento nessa área.

Este trabalho apresentou uma análise da influência e atuação de diodos de *bypass* no desempenho de um módulo fotovoltaico comercial, com o objetivo de verificar a diferenciação das características elétricas das células individuais (mismatch), como também a interferência causada na potência produzida, através do sombreamento individual de cada célula que compunha o módulo. Os ensaios foram realizados com simulador solar SunSim 3C, com alta classificação A+A+A+ conforme norma IEC 60904-9, obedecendo os critérios de condições padrão de teste (STC). O módulo de ensaio refere-se a um modelo de 60 células de silício multicristalino associadas em série de 265 W, com a colocação de três diodos de *bypass*, cada qual conectado a um conjunto de 20 células em série. O ensaio foi realizado individualmente a cada célula fotovoltaica com bloqueio de irradiância, e desta forma, sendo obtidas as 60 curvas I-V representativas desde módulo, que concede valores de potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), tensão de circuito aberto (V_{oc}), tensão de máxima potência (V_{mp}), corrente de curto circuito (I_{sc}), corrente de máxima potência (I_{mp}), resistência série (R_s) e resistência shunt (R_p).

Com tal experimento foi possível verificar o alto padrão de confiabilidade de produção dos módulos fotovoltaicos comerciais com a atuação dos diodos de *bypass*. Os parâmetros elétricos são muito similares com a proteção dos diodos, caso haja algum sombreamento, sendo que a potência produzida não sofre variações relevantes com o sombreamento de uma célula aleatória em relação à outra, com uma diferença percentual encontrada de no máximo 0,65% entre duas células. Os parâmetros que mais apresentaram desvios padrão são referentes às resistências série e shunt, atingindo patamares de até 67% de diferença entre células referente à resistência série e 62% na resistência shunt. Tais resultados indicam que o algoritmo de cálculo do simulador solar não é o mais adequado para as condições de ensaio empregadas, com sombreamento de células fotovoltaicas e atuação de diodos de *bypass*.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. 2017. Geração Distribuída: Unidades consumidoras com geração distribuída. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 23 jan. 2018.
- Bishop, J. W., 1988. Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar Cells*, vol. 25, pp. 73-89.
- Bucciarelli, L.L., 1979. Power loss in photovoltaic arrays due to mismatch in cell characteristics. *Solar Energy*, vol. 23, n. 4, pp. 277-288.
- Chamberlin, C. E., Lehman, P., Zoellick, J., Pauletto, G., 1995. Effects of mismatch losses in photovoltaic arrays. *Solar Energy*, vol. 54, n. 3, pp. 165-171.
- Crozier, J.L., Van Dyk, E.E., Vorster, F.J., 2016. Characterization of cell mismatch in a multi-crystalline silicon photovoltaic module. *Physica B, Amsterdam*, v. 43, n. 37, p.1578-1581, maio 2011.
- Costa, E.R., Defferrari, C., Krenzinger, A., 2011. Qualificação espectral de simuladores solares para ensaios de módulos fotovoltaicos. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, v. 4, pp. 1-8.
- Daliento, S., Di Napoli, F., Guerriero, P., D'Alessandro, V., 2016. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. *Solar Energy*, v. 134, pp. 211-218.
- Dalmagro, P.S.; Krenzinger, A., 2013. Análise de Simuladores Solares para Ensaios de Módulos Fotovoltaicos. In: Salão UFRGS 2013: SIC - XXV Salão De Iniciação Científica da UFRGS, 15, Poster, Porto Alegre.
- Forniés, E, Naranjo, F., Mazo, M., Ruiz, F., 2013. The influence of mismatch of solar cells on relative power loss of photovoltaic modules. *Solar Energy*, v. 97, pp.39-47.
- Gasparin, F.P, Buhler, A.J., Rampinelli, G.A., Krenzinger, A., 2016. Statistical analysis of I-V curve parameters from photovoltaic modules. *Solar Energy*, v. 131, pp. 30-38.
- Hecktheuer, L.A., Krenzinger, A., 2000. Uso de diodos de *bypass* e de bloqueio na proteção de sistemas fotovoltaicos. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Mecânica, 1., Natal. Anais do CONEM 2000, pp. 1 - 7.
- Hecktheuer, Lúcio Almeida., 2001. Análise de associações de módulos fotovoltaicos. 2001. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Hincapie, C.; Picoli, L.; Gasparin, F.; Krenzinger, A., 2014. Estudo e Montagem de Túnel para Simulador Solar. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife.
- Jung, T., Song, H., Ahn, H., Kang, G., 2014. A mathematical model for cell-to-module conversion considering mismatching solar cells and the resistance of the interconnection ribbon. *Solar Energy*, v. 103, pp.253-262.
- Peroza, J., Rampinelli, G.A., Gasparin, F.P., Krenzinger, A., 2015. Ensaio de módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias com utilização de simulador solar. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 36, pp. 41-47.
- Pinho, J.T., Galdino, M.A. (Org.), 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel.
- Silvestre, S., Chouder, A., 2008. Effects of shadowing on photovoltaic module performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Issue 2, v.16, pp. 141-149.
- Silvestre, S., Boronat, A., Chouder, A. 2009. Study of bypass diodes configuration on PV modules. *Applied Energy*, v. 86, pp. 1632-1640.
- Souza, R. B., Prieb, C. W. M., Krenzinger, A. 2012. Análise De Simuladores Solares Para Ensaio De Módulos Fotovoltaicos. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo.

Abstract. *The performance of a photovoltaic system depends on several factors, such as the availability of solar radiation and its spectral distribution, temperature of the photovoltaic module, dirt, losses of cabling, etc. One of the factors that affects the power of the photovoltaic matrix is the mismatch loss due to the differences between each cell that makes up the module, and the cell characteristics depend on manufacturing processes, which result in a certain variability in the parameters of the I-V curve. A procedure that led to an improving the efficiency and power generation of photovoltaic modules concerns the use of bypass diodes, characterized as diodes protecting against the effects of mismatch and shadowing. This work presents an analysis of the influence and performance of bypass diodes on the performance of a commercial photovoltaic module in order to verify the differentiation of the electric characteristics of the individual cells as well as the interference caused in the power produced. The tests were performed with the use of a solar simulator to determine the I-V curves with the blocking of irradiance of each cell that composes the photovoltaic module. The obtained results indicate that the electrical parameters are very similar with the protection of the diodes, and the power produced does not suffer significant variations with the shading of a random cell in relation to the other, with a percentage difference found of a maximum of 0.6% between two cells. The parameters of series resistance and shunt resistance were also analyzed, presenting the highest percentages of difference between the photovoltaic cells, being observed that the attainment of these parameters by calculation of the solar simulator is not adequate to the applied conditions of the test.*

Key words: *mismatch, shading, bypass diodes.*