

EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Carlos Roberto Coutinho – crcoutinho@ifes.edu.br

Adriano Fazolo Nardoto – anardoto@ifes.edu.br

Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria de Eletrotécnica, campus São Mateus

José Rafael Cápuá Proveti – jose.proveti@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Naturais

Daniel José Custódio Coura – daniel.coura@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento Computação e Eletrônica

Resumo. *O presente trabalho aborda os efeitos provocados em sistemas de microgeração devido ao sombreamento de módulos fotovoltaicos. Embora os sistemas fotovoltaicos sejam uma alternativa na geração de eletricidade, se deve levar em consideração as estruturas próximas à instalação. Estruturas ao entorno de módulos fotovoltaicos provocam regiões de sombra que podem afetar seu funcionamento. A forma como as células fotovoltaicas são interligadas, propicia o mau funcionamento de parte considerável dos módulos fotovoltaicos, reduzindo assim a potência gerada pelo sistema, sob o sombreamento de poucas células. Através de um circuito eletrônico que varia a carga aplicada ao módulo fotovoltaico, e a coleta de dados como tensão e corrente elétrica, são traçadas as curvas características de módulos fotovoltaicos, sob diferentes níveis de sombreamento. Estas curvas são utilizadas na comparação entre os diferentes níveis e na verificação dos efeitos provocados pelo sombreamento. Ao final, o trabalho propõe a utilização de diodos de bypass como possível solução para instalações onde os efeitos provocados pelo sombreamento são eminentes.*

Palavras-chave: *Módulo fotovoltaico, sombreamento, célula fotovoltaica.*

1. INTRODUÇÃO

Preocupada com melhores condições para o desenvolvimento sustentável do setor elétrico brasileiro, bem como o aproveitamento adequado dos recursos naturais e utilização eficiente das redes elétricas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em abril de 2012 a resolução normativa número 482, que estabelece as condições de acesso à micro e minigeração de energia elétrica (ANEEL, 2012). Com esta resolução, qualquer consumidor do sistema elétrico, além de comprar, pode gerar parte ou toda energia elétrica que consome, e ainda fornecer o excedente para a concessionária podendo ser compensado por isso. Este tipo de geração, também chamada de geração distribuída, apresenta como grande vantagem o fato de a carga estar mais próximo, ou dentro da unidade geradora, reduzindo as perdas e possibilitando melhor qualidade no serviço. Segundo (Moreira, 2012) o conceito de microgeração tem sido objeto de estudo por vários autores, tendo sido definida como sendo a produção de calor ou energia em pequena escala quando comparada com as centrais termoeletricas típicas, normalmente variando de alguns kW até algumas dezenas de MW.

A diferença básica entre microgeração e minigeração, segundo (ANEEL, 2012), é a potência que cada central pode produzir, menor ou igual a 100 kW e de 100 a 1 MW respectivamente. Este tipo de geração já é amplamente utilizado em países europeus, como Alemanha e Espanha, porém, no Brasil ainda caminha a passos curtos.

Em uma unidade de microgeração, a energia elétrica pode ser gerada pela energia solar, por meio de painéis fotovoltaicos. Esta energia gerada é interligada a um inversor de frequência, transformando-a de contínua para alternada, para que possa alimentar as cargas instaladas na residência (ANEEL, 2014). Caso a potência demandada nesta instalação seja menor que a consumida, este excedente pode ser cedido à concessionária, ficando o consumidor com os créditos da energia fornecida. Nos períodos em que a geração não consegue suprir a potência demandada, a instalação se utiliza da energia da rede de distribuição e é compensada pelos períodos em que forneceu. Nesta instalação se faz necessário ainda um medidor capaz de contabilizar a quantidade de energia fornecida e a consumida, para que ocorra uma compensação àquela que mais forneceu energia, a concessionária ou residência (Moreira, 2012).

Vislumbrando uma forma de gerar energia de maneira limpa e sustentável, e ainda, diminuir os custos domiciliares devido aos constantes aumentos nas tarifas de energia elétrica, os consumidores estão cada vez mais interessados em transformar suas residências em uma unidade de micro, ou até mesmo minigeração através da conversão da energia solar em energia elétrica.

2. SOMBREAMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Um grande problema encontrado na produção de energia elétrica através da radiação solar é, que devido às construções ao entorno da unidade de consumo, o período em que os painéis ficam expostos à radiação se torna menor. Edifícios, torres de comunicação e outras estruturas acabam interferindo na captação de radiação, provocando áreas de sombra no equipamento fotovoltaico. A Fig. 1 mostra algumas situações de sombreamento, que podem afetar a produção de energia elétrica.

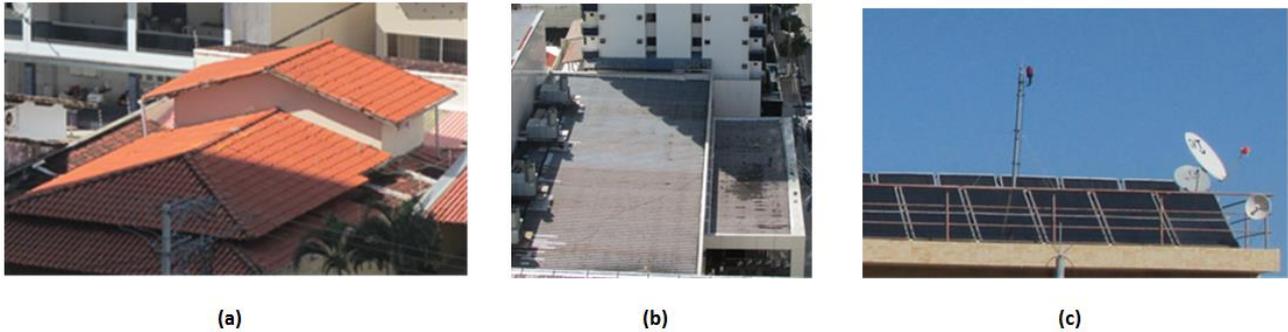


Figura 1 - Exemplos de sombreamento. Fonte: autor.

No caso das Figs. 1(a) e 1(b), a sombra provocada pela estrutura vizinha pode interromper totalmente a captação de radiação solar em um módulo ali instalado. Este tipo de sombreamento, chamado de sombreamento total, faz com que este módulo deixe de fornecer energia, e, dependendo do arranjo montado, pode interferir em todo o sistema de geração fotovoltaica. A Fig. 1(c) ilustra um caso de sombreamento parcial, onde a sombra sobre algumas células pode fazer com que o módulo deixe de fornecer energia.

Uma maneira de minimizar as perdas nos painéis fotovoltaicos por sombreamento é a utilização de diodos de *bypass*. Estes dispositivos tem a função de isolar as células ou painéis afetados pelo sombreamento, impedindo que todo o sistema de geração de energia seja afetado.

2.1 Efeito do sombreamento no módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico consiste em um arranjo de células fotovoltaicas ligadas em série e paralelo. A ligação série é feita para que se alcance um nível de tensão desejado, enquanto a ligação paralela aumenta a corrente elétrica fornecida (Hecktheuer, 2001). A Fig. 2 ilustra a ligação em série de quatro células fotovoltaicas, bem como o fluxo de corrente nestas quando há a presença de radiação solar.

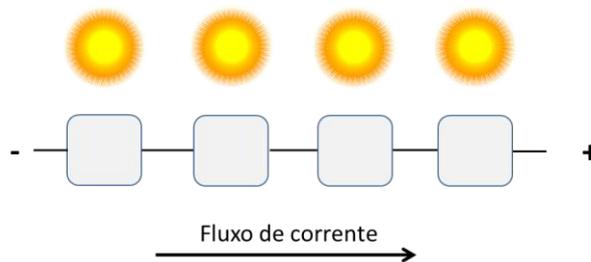


Figura 2 - Ligação série de células fotovoltaicas. Fonte: adaptado de (Villalva & Gazoli, 2012).

Segundo (Resende, 2004), as células fotovoltaicas são fotodiodos, que, sob a presença da radiação solar, fornecem corrente elétrica para um circuito. O grande problema ao serem ligadas em série, se dá ao fato que se uma das células não mais receber a radiação solar, ela deixa de conduzir, impedindo que todo o arranjo forneça corrente elétrica ao circuito (CRESESB, 2008) conforme ilustra a Fig. 3.

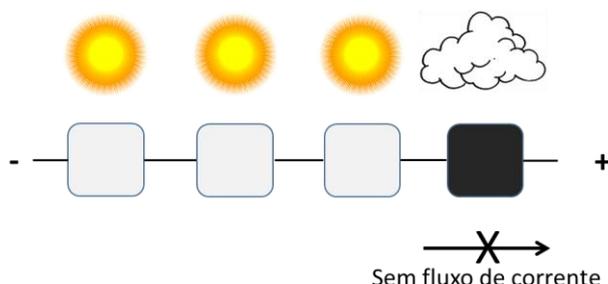


Figura 3 - Ligação em série de células fotovoltaicas com sombreamento. Fonte: adaptado de (Villalva & Gazoli, 2012).

Uma possível solução para este problema é a inserção de um diodo em paralelo com uma célula, ou um arranjo de células, para que este desvie a corrente da célula sombreada. Este diodo, também chamado de diodo de *bypass* é responsável em não permitir que todo o módulo seja afetado pelo sombreamento de uma única célula, além de proteger o módulo contra tensões reversas muito altas que poderiam causar o aparecimento de pontos quentes com conseqüente deterioração do módulo (Hecktheuer, 2001). A Fig. 4 ilustra o funcionamento do diodo de *bypass*.

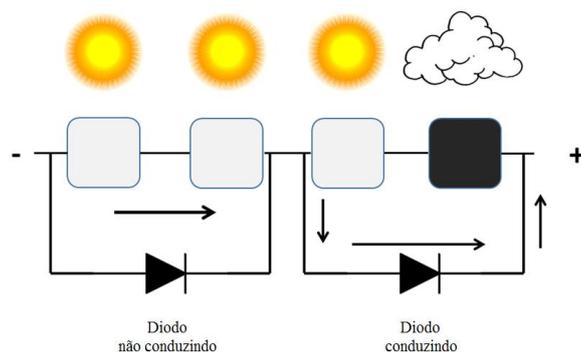


Figura 4 - Células fotovoltaicas com diodo de *bypass*. Fonte: adaptado de (Villalva & Gazoli, 2012).

Os módulos fotovoltaicos comercializados são formados por conjuntos de células fotovoltaicas interligadas em série (Carvalho, 2013), logo, estão sujeitos ao problema do sombreamento. Para amenizar os efeitos, são interligados alguns diodos de *bypass* a grupos de células.

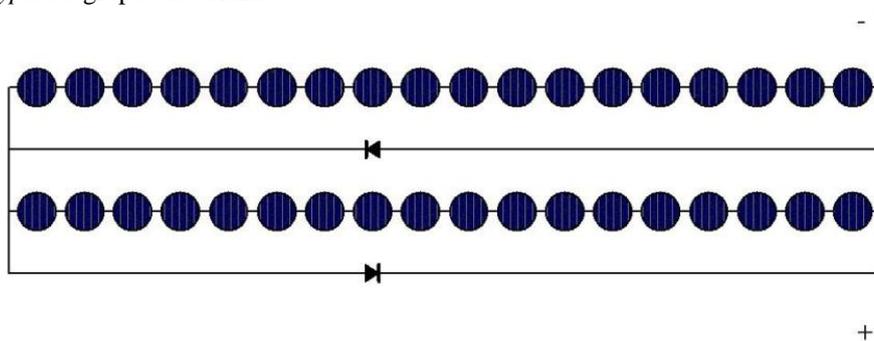


Figura 5 - Ligação de diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos. fonte: (CRESESB, 2008).

A Fig. 5 ilustra a ligação dos diodos de *bypass* em um módulo fotovoltaico, onde cada um dos diodos protege um grupo de dezoito células. Caso ocorra o sombreamento em uma célula, todo o grupo ao qual está inserida será afetado, entrando em funcionamento o diodo que cria um desvio para a corrente gerada no módulo. Quando o sombreamento atinge células de grupos distintos, os dois diodos entram em funcionamento, e embora o módulo deixe de fornecer potência, evitará danos (Hecktheuer, 2001).

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos. O estudo se baseia na comparação da capacidade de geração de energia de módulos fotovoltaicos sob diferentes níveis de sombreamento. Além dos efeitos do sombreamento, verificar também sua minimização através dos diodos de *bypass*.

3. METODOLOGIA

A quantidade de radiação solar incidente sobre um módulo fotovoltaico influencia diretamente na quantidade de energia elétrica produzida. Assim, quando uma parte deste módulo deixa de ser iluminada, ou sombreada, ela deixa de fornecer potência à carga.

Com o objetivo de verificar este fenômeno, este trabalho realiza comparações com painéis sombreados e não sombreados, e compara a potência gerada em ambos os casos. A forma como é feita a comparação e as ferramentas utilizadas são descritas nos tópicos a seguir

3.1 Coleta de dados

Segundo (Gasparin, 2009), a curva corrente versus tensão (I-V) descreve o comportamento da corrente em função da tensão em uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico. A curva descreve como estas grandezas variam de acordo com a variação da carga conectada, estando diretamente ligada à irradiância, e inversamente à temperatura. Da mesma forma, a curva de potência, potência versus tensão (P-V) caracteriza a variação da potência fornecida pelo sistema fotovoltaico.

Como o objetivo do presente trabalho é verificar o efeito do sombreamento, a análise das curvas características será utilizada na comparação da resposta dos módulos fotovoltaicos ao sombreamento. Desta forma, utiliza um sistema eletrônico que varia a carga conectada ao módulo e coleta dados de tensão e corrente. Este sistema, através de transistores de junção bipolar (BJT), simula uma carga que parte de valores próximos a um curto-circuito, e atinge o valor máximo de um circuito aberto. Os dados coletados são enviados a um software matemático, que é responsável em plotar as curvas.

Devido à influência da temperatura e da irradiância, estas duas grandezas também foram mensuradas. Para as medidas de temperatura dos painéis foi utilizada a câmera termográfica da marca Irisys modelo IRI4035, bem como as medidas de irradiância foram feitas com o medidor da marca Icel modelo SP-2000.

3.2 Simulação do sombreamento

Para verificação dos efeitos do sombreamento são utilizados os módulos fotovoltaicos da marca Kyocera, modelo KD135SX-UPU. Estes módulos são fabricados com silício policristalino, e possuem uma eficiência em torno de 16%. Cada um dos módulos é constituído por 36 células no total interligadas em série, com dois diodos de *bypass*, um para cada grupo de dezoito células, como ilustrado pela Fig. 5. Cada um dos painéis será testado sob três condições diferentes, para que seja feita a comparação.

Os testes foram realizados considerando três situações distintas:

- Módulos sem sombreamento: no primeiro teste os módulos ficaram expostos à radiação solar sem nenhuma célula obstruída, conforme Fig. 6 (a). Após traçar suas curvas, foram adotadas como parâmetro de comparação com as curvas nos testes onde ocorre sombreamento;
- Sombreamento total de uma célula, com o objetivo de verificar o efeito provocado, a segunda etapa consistiu em sombrear totalmente uma célula de cada módulo, conforme Fig. 6(b) e plotar suas curvas. O efeito foi provocado instalando um anteparo entre o módulo e a direção do sol;
- Sombreamento total de duas células afetando os dois arranjos do módulo. Como os módulos possuem dois arranjos série, cada um com um diodo de *bypass*, ao bloquear a radiação em uma célula de cada, a potência fornecida pelo módulo fica totalmente comprometida. Da mesma forma, que nos testes anteriores, o efeito foi provocado instalando um anteparo entre o módulo e a direção do sol.

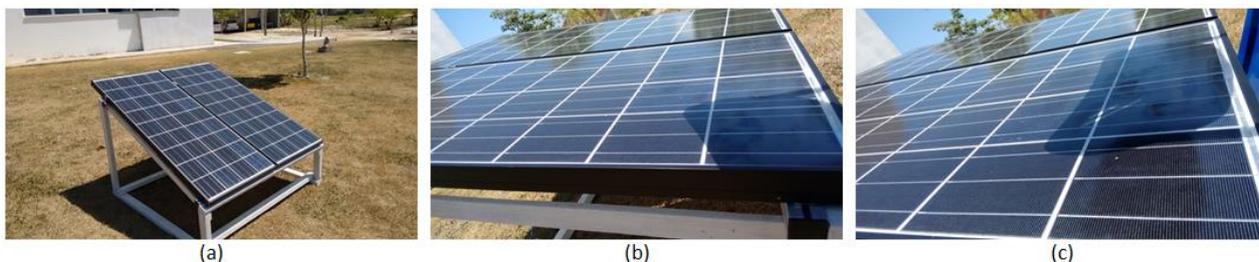


Figura 6 - Testes de sombreamento realizados nos módulos fotovoltaicos. Fonte: autor.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Para cada um dos dois módulos foram traçadas as curvas P-V e I-V para os três casos propostos na subseção 3.2, as curvas obtidas são apresentadas a seguir.

4.1 Módulo 1

Os dados coletados no Módulo 1, foram sob uma irradiância de 740 W/m^2 e temperatura de $51,2 \text{ }^\circ\text{C}$, medidos com os instrumentos descritos na subseção 3.1. As curvas sem sombreamento, com uma e duas células sombreadas seguem respectivamente.

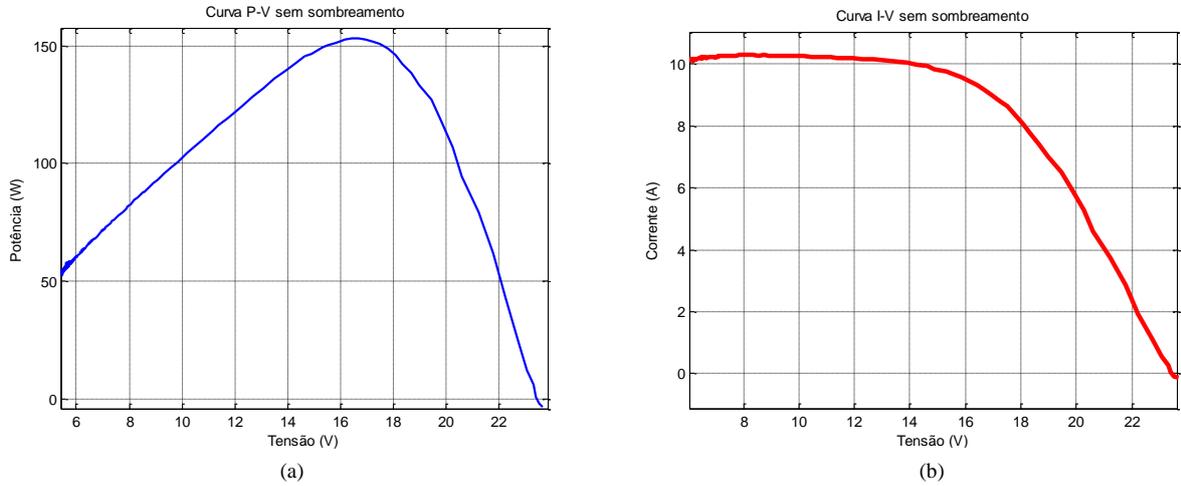


Figura 7 - Curvas P-V e I-V do Módulo 1 sem sombreamento.

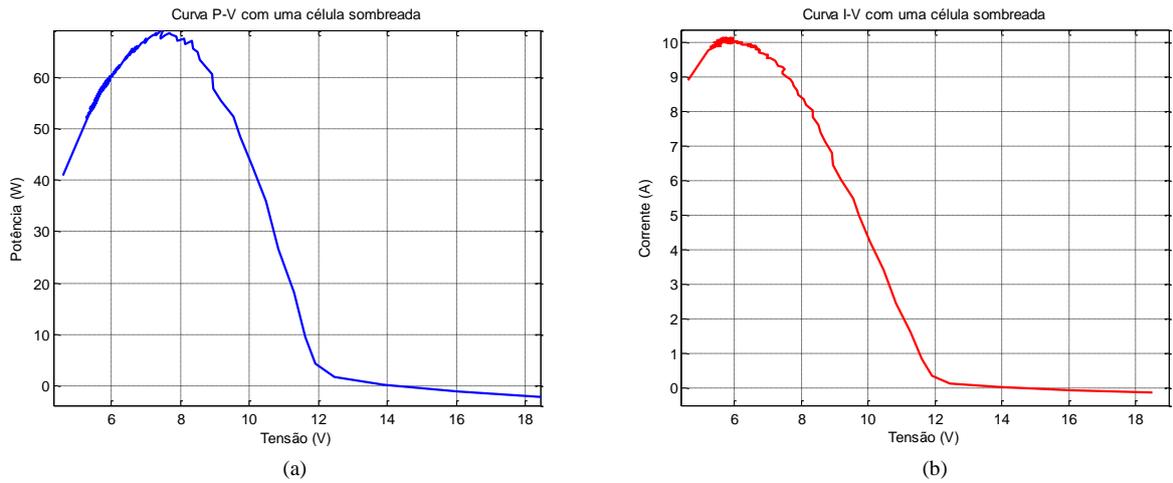


Figura 8 - Curvas P-V e I-V do módulo 1 com sombreamento em uma célula.

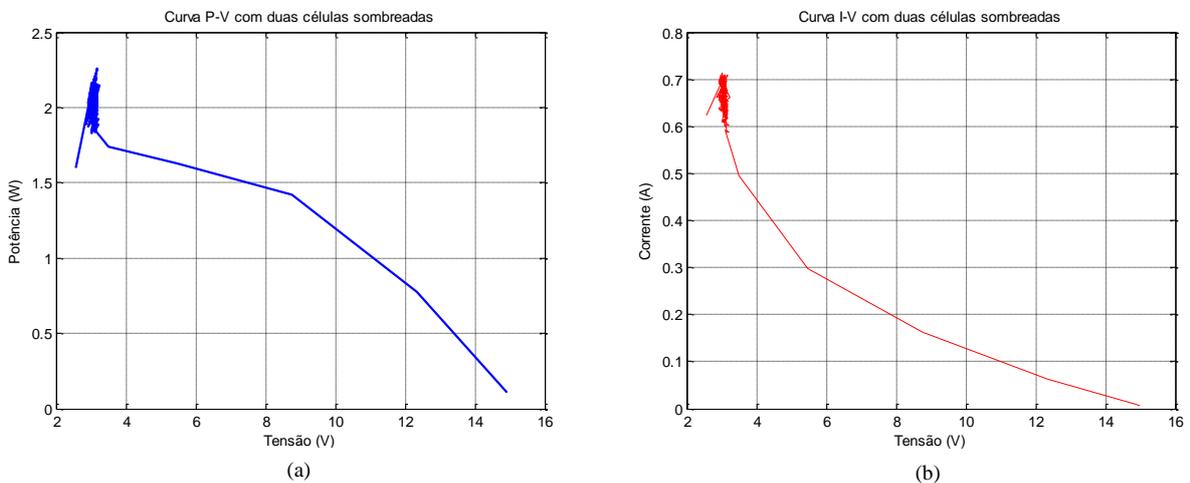


Figura 9 - Curvas P-V e I-V do módulo 1 com sombreamento em duas células.

4.2 Módulo 2

Os dados coletados no Módulo 2, foram sob uma irradiância de 690 W/m^2 e temperatura de $51,7 \text{ }^\circ\text{C}$, medidos com os instrumentos descritos na subseção 3.1. As curvas sem sombreamento, com uma e duas células sombreadas seguem respectivamente.

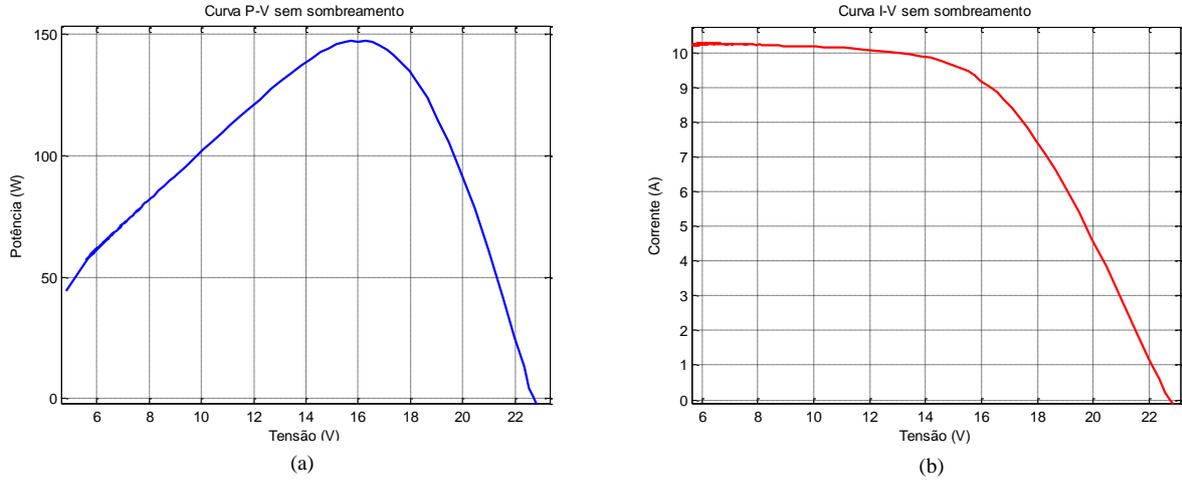


Figura 10 - Curvas P-V e I-V do módulo 2 sem sombreamento.

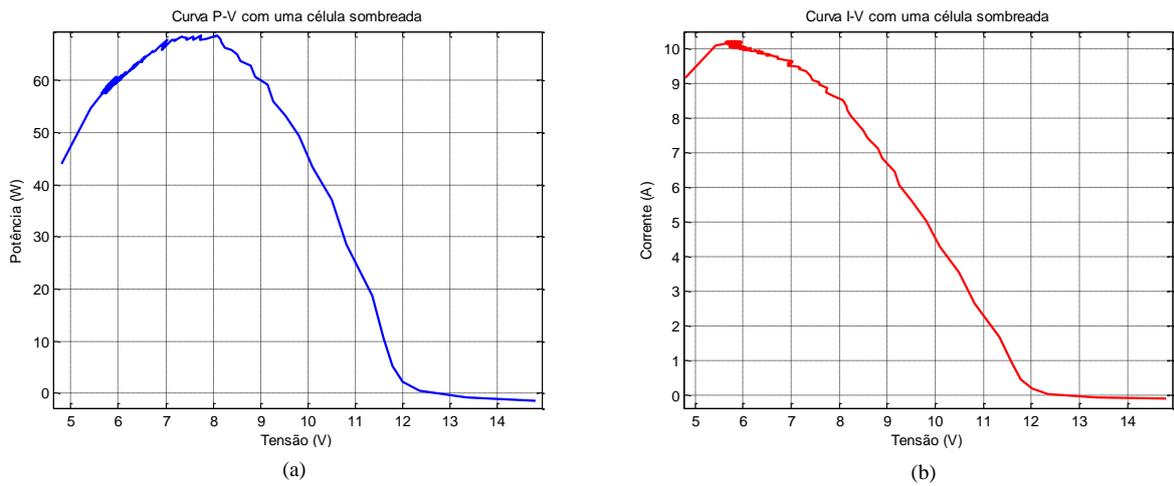


Figura 11 - Curvas P-V e I-V do módulo 2 com sombreamento em uma célula.

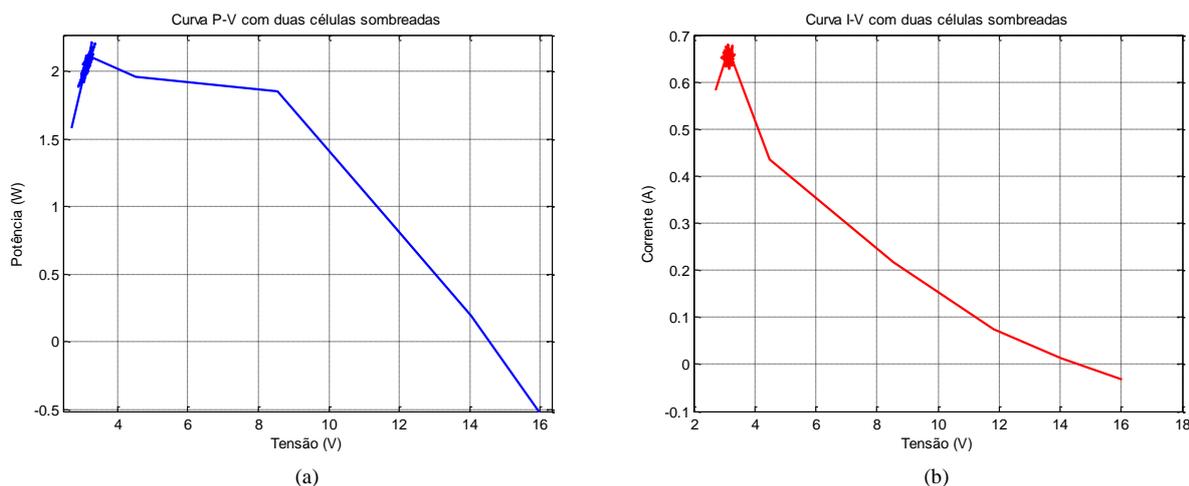


Figura 12 - Curvas P-V e I-V do módulo 2 com sombreamento em duas células.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao comparar as curvas P-V sem sombreamento com as com uma célula sombreada, de ambos os módulos, se pode verificar uma queda na potência máxima atingida em aproximadamente cinquenta por cento. Sem sombreamento todas as células do módulo estão fornecendo potência à carga, enquanto ao sombrear uma célula, todo um conjunto de dezoito células deixa de fornecer potência. Desta forma, apenas metade do módulo continua funcionando.

Outra observação importante nesta primeira comparação é em relação ao nível de tensão fornecido pelos módulos, que também sofreu uma redução em torno de cinquenta por cento. Como apenas metade do módulo continuou funcionando, a tensão entregue à carga é justamente a referente à esta metade. A corrente fornecida não sofreu grandes alterações, pois todas as células estão ligadas em série.

Um grande efeito nas grandezas observadas verifica-se ao sombrear duas células nos módulos. Como estas células são uma de cada grupo, os dois arranjos série deixam de funcionar, entregando uma potência praticamente zerada à carga.

6. CONCLUSÕES

Diante dos dados coletados este trabalho aponta as seguintes conclusões:

- Pequenas áreas de sombra podem acarretar um grande efeito aos sistemas de microgeração;
- Sendo a potência elétrica o produto entre tensão e corrente elétrica, a redução na potência entregue à carga é devido à queda no nível de tensão;
- A queda no nível de tensão entregue também pode provocar mau funcionamento nos inversores de frequência do sistema de microgeração, pois trabalham com um valores mínimos de tensão em sua entrada. Um módulo sombreado pode gerar uma tensão abaixo da mínima necessária ao funcionamento do inversor, afetando todo o sistema de microgeração.
- Os inversores de frequência possuem um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), porém, um conjunto de módulos fotovoltaicos sob sombreamento pode gerar diferentes pontos de máxima potência, dificultando assim a correta atuação do sistema de rastreamento, fazendo com que opere em um ponto (máximo local) diferente daquele onde o máximo de potência poderia ser extraído do sistema fotovoltaico. Este problema pode ser minimizado com a utilização de inversores com mais de uma entrada de MPPT;
- O sombreamento em uma única célula compromete a metade do módulo. Caso este sombreamento atinja duas células de diferentes grupos todo o módulo ficará comprometido;
- Os diodos de *bypass* mostraram sua eficácia na minimização dos efeitos, uma vez que ao sombrear uma célula, apenas uma metade do módulo deixa de funcionar. Caso as células estivessem interligadas sem este componente, todo o módulo deixaria de funcionar;
- Com a ligação de um maior número de diodos de *bypass*, ao invés de dois grupos de dezoito células quatro grupos de nove células, a redução na potência poderia estar em torno de vinte cinco ou cinquenta por cento, nos casos de sombreamento de uma e duas células respectivamente;
- Módulos com um maior número de diodos de *bypass*, embora tenham um maior custo, podem ser uma solução viável a unidades de microgeração onde as estruturas vizinhas possam provocar sombreamento.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Resolução Normativa n° 482, Pub. L. No. 482/2012 (2012). Brasília. Disponível em: <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ANEEL. (2014). *Micro e Minigeração Distribuída*. Brasília: ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>
- Carvalho, P. M. S. de. (2013). *Modelação e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos*. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. Disponível em: <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/2541/1/Dissertação.pdf>
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. (2008). Energia solar princípios e aplicações. *Centro de Referência Para Energia Solar E Eólica*, 28. [http://doi.org/10.1016/0038-092X\(72\)90013-8](http://doi.org/10.1016/0038-092X(72)90013-8)
- Gasparin, F. P. (2009). *Sistema traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos*. Disponível em: <ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/gasparin.pdf>
- Hecktheuer, L. A. (2001). *Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos*. UFRGS. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2125/000314640.pdf?sequence=1>
- Moreira, D. (2012). *Implementação de microgeração no sector residencial*. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/60292>
- Resende, S. M. (2004). *Materiais e Dispositivos Eletrônicos* (2nd ed.). São Paulo: Livraria da Física.
- Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2012). *Energia Solar Fotovoltaica* (1st ed.). São Paulo: Érica.

SHADING EFFECT IN PHOTOVOLTAICS MODULES

Abstract. *This paper discusses the effects caused in microgeneration systems due to shading of photovoltaic modules. Although photovoltaic systems are an alternative for power generation, one should take into consideration the next to install structures. The structures around photovoltaic modules cause shadow regions that may affect its operation. The way solar cells are interconnected, provides the malfunction of a considerable part of the photovoltaic modules, thus reducing the power generated by the system, under the shade of a few cells. Through an electronic circuit that varies the load applied to the photovoltaic module, and collecting data as voltage and electric current, the characteristic curves of photovoltaic modules under different levels of shading are drawn. These curves are used in the comparison between the different levels and verification of the effects caused by shading. Finally, the paper proposes the use of bypass diodes as a possible solution for installations where the effects caused by shading are eminent.*

Key words: *Photovoltaic module, shading, photovoltaic cell.*