

RUPTURA POR AVALANCHE EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E SUAS IMPLICAÇÕES EM ANÁLISES DE ASSOCIAÇÕES NO SOFTWARE CREARRAY

Josiane Peroza - josi_peroza@hotmail.com

Arno Krenzinger - arno.krenzinger@ufrgs.br

Daniel Aguiar - cirdors@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC / Laboratório de Energia Solar (LABSOL)

4.2 Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos.

Resumo. 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. Para poder determinar resultados de associações de células em módulos ou arranjos de módulos é necessário conhecer o desenvolvimento da curva I-V em toda sua extensão. Para evitar efeitos danosos na operação de sistemas fotovoltaicos por questões de descasamento de desempenho entre células em série, é bem comum fazer uso de diodos de desvio, mas mesmo para determinar como estes devem ser instalados e qual a sua consequência, também se deve estudar as correntes que podem fluir nas células na ausência destes dispositivos de proteção. Este artigo apresenta uma análise da corrente reversa de células fotovoltaicas submetidas à ruptura por avalanche e as implicações destes resultados nos cálculos das resultantes de associações série de células em módulos. Células fotovoltaicas de um mesmo módulo tiveram sua irradiância bloqueada para o ensaio de curva característica, sem a presença de diodos de desvio, com o auxílio de um simulador solar. Com as curvas resultantes foram determinados parâmetros para descrever a corrente de ruptura por avalanche. Estes valores foram inseridos na rotina do programa computacional Crearray. Em sua versão 3.0 e com a atualização dos parâmetros medidos, o programa pode simular as resultantes de módulos e arranjos com sombreamento parcial permitindo comparar situações com ou sem a presença de diodos de desvio.

Palavras-chave: ruptura por avalanche, células fotovoltaicas, associação de células.

1. INTRODUÇÃO

Em um período em que o custo de energia elétrica atinge altos patamares, investir em geração distribuída torna-se uma opção bastante atrativa para os consumidores, tendo em vista que os mesmos podem se tornar produtores de sua própria eletricidade.

Em relação à geração distribuída, no Brasil o número de conexões de micro e minigeração de energia superou 16 mil instalações, sendo que a fonte mais utilizada pelos consumidores-geradores é a energia solar fotovoltaica, ultrapassando 136 MW de potência instalada (ANEEL, 2017).

Atualmente, a energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma alternativa promissora para inserção de energias renováveis na matriz elétrica, destacando-se por ser uma energia de fonte inextinguível e disponível, com tecnologia bem difundida e conhecida, que proporciona confiabilidade, além da apresentada redução de custos de produção.

A conversão da energia solar diretamente em energia elétrica é possível devido ao efeito fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica o dispositivo fundamental para tal conversão de energia. A compreensão do funcionamento e desempenho de uma célula fotovoltaica e suas possíveis associações, como por exemplo, para a fabricação de um módulo fotovoltaico, torna-se essencial para a difusão e inserção deste tipo de energia na geração distribuída.

A caracterização é um processo importante de avaliação do desempenho elétrico de uma célula solar, sendo que a determinação da curva I-V assume um papel relevante, não apenas para determinar o desempenho, mas também para o planejamento dos circuitos de associação de células em um módulo e análise da necessidade de inserir elementos de proteção, como os diodos de desvio.

Segundo Saha *et al.* (1988), em um sistema fotovoltaico ideal, os componentes fotovoltaicos (células ou módulos) conectados em série ou paralelo devem possuir as mesmas características elétricas de corrente e tensão. No entanto, na prática, os componentes fotovoltaicos não são idênticos. A variação entre as características individuais de cada célula fotovoltaica em uma ligação em série ou paralelo, como tensão e principalmente corrente fotogerada, geram o chamado descasamento (*mismatch*) das células, podendo ocasionar perdas na potência. Dessa forma, a máxima potência gerada será menor do que a soma das potências das células individuais, ainda que todas atuem nas mesmas condições de irradiância e temperatura. Diversos autores estudaram os efeitos do *mismatch* e analisaram a interferência da configuração de células e módulos (Bucciarelli, 1979; Chamberlin *et al.*, 1995; Jung *et al.*, 2014).

Diferenças elétricas, devido ao sombreamento ou danificação das células, reduz a eficiência de um sistema fotovoltaico e causa pontos de aquecimento (*hot-spots*), um modo defeituoso de operação que pode danificar o encapsulamento da célula e reduzir permanentemente a potência do sistema (Bishop, 1988).

A formação de pontos quentes está relacionada à estrutura interna dos módulos fotovoltaicos, geralmente fabricados pela conexão de células fotovoltaicas individuais em série, em que cada uma comporta-se como uma fonte de corrente independente. Quando a corrente fornecida por uma célula é menor do que em relação as outras, essa célula funciona em modo de polarização reversa e dissipa potência em forma de calor, reduzindo a corrente fotogerada e podendo danificar essa célula ou até mesmo todo o módulo (Daliento *et al.*, 2016).

Uma célula fotovoltaica com total bloqueio de iluminação em um arranjo série de módulo fotovoltaico torna-se inversamente polarizada, sendo que sua tensão positiva se estende para a tensão de circuito aberto de aproximadamente 0,6 V, porém a característica de polarização reversa é muito mais extensa e limitada por uma tensão de ruptura mais elevada (*breakdown*) (Herrmann; Wiesnet; Vaaben, 1997).

Efeitos da corrente reversa foram estudados por alguns autores. Sidawi *et al.* (2011) apresentou um experimento onde módulos fotovoltaicos típicos de silício amorfo foram submetidos a características reversas por diferentes durações de tempo, demonstrando o dano significativo nos módulos devido a corrente reversa que poderia ser gerada em células sombreadas. Abdullah *et al.* (2013) caracterizou os defeitos criados em células fotovoltaicas de silício monocristalino operando em condições extremas, submetidas a corrente reversa em temperatura ambiente e por vários períodos de tempo. Foi observado que o efeito de corrente reversa é um fator importante não só na determinação de desempenho e eficiência de células e módulos fotovoltaicos, como também provou ser um fator dominante na determinação de tempo de vida útil das células.

Para proteger os módulos fotovoltaicos contra os efeitos de *mismatch* e sombreamento, e assim minimizar a aparição de pontos quentes e a perda de potência, a inserção de diodos de desvio (*bypass*) se faz de grande importância. Esta medida limita a tensão de polarização na célula sombreada e, portanto, a potência dissipada. Conectando-se em anti-paralelo com os extremos da célula um diodo de desvio, 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 desvio encontra-se reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente. Este diodo de desvio deve ser capaz de conduzir toda a corrente gerada pela associação série e sua tensão de condução deve ser a menor possível (Hecktheuer, 2001). Usualmente, os diodos de desvio são conectados em anti-paralelo a conjuntos de células. Existem alguns estudos que abordam a configuração de diodos de desvio em módulos fotovoltaicos a fim de analisar os efeitos de sombreamento, descasamento e pontos quentes (Hecktheuer e Krenzinger, 2000; Silvestre; Boronat; Chouder, 2009; Daliento *et al.*, 2016).

A completa descrição dos efeitos de descasamento elétrico em um sistema fotovoltaico requer a determinação de operação de corrente e tensão da célula. O programa Crearray faz a análise desde uma célula fotovoltaica até sistemas fotovoltaicos complexos, sendo possível observar todo o funcionamento da célula, nos três quadrantes, reproduzindo efeitos de corrente e tensão, englobando o efeito da corrente reversa.

Em vista disso, este artigo apresenta uma análise do funcionamento de uma célula fotovoltaica em suas características de corrente reversa. Células fotovoltaicas de um mesmo módulo foram sombreadas e desta maneira obtidas suas respectivas curvas I-V, incluindo a polarização inversa. Com o modelo de equação proposto por Bishop (1988), parâmetros de corrente de ruptura das células e tensão de ruptura (*breakdown*) foram obtidos e estes inseridos na rotina do programa computacional Crearray, a fim de demonstrar didaticamente o comportamento de uma célula fotovoltaica em condições de completo bloqueio de luz, sendo uma ferramenta útil para análise do funcionamento de uma célula fotovoltaica e suas possíveis associações dentro de módulos.

2. PROGRAMA COMPUTACIONAL CREARRAY

O programa de simulação Crearray atua como uma ferramenta que tem por objetivo analisar o comportamento de uma associação de células ou de módulos fotovoltaicos, considerando efeitos de temperatura, irradiância e possíveis diferenças elétricas e sombreamentos nas células dos módulos que compõem a instalação. O programa desenvolvido originalmente em 1993 no sistema operacional MS-DOS, foi depois reconstruído em Visual Basic (VB) para Windows e fornece a curva característica I-V da associação a partir da estimativa das curvas características individuais de cada célula ou módulo, as quais são obtidas através de um modelo matemático (Krenzinger e Adams, 2000). Na sua primeira versão em VB os dados de entrada eram aqueles encontrados nos catálogos fornecidos pelos fabricantes dos módulos, com dificuldades de obter bons resultados porque estes dados são valores médios raramente representando módulos efetivamente existentes. Nas versões posteriores foi permitido ingressar com dados obtidos experimentalmente, aperfeiçoando sua funcionalidade. Na versão 2 incluiu a possibilidade de inserir diodos no circuito e processar curvas medidas nos arranjos. Na atual versão 3, os dados de catálogo foram revisados para módulos comerciais existentes no mercado brasileiro e revisada a característica de corrente reversa por avalanche, objeto do presente trabalho.

2.1 Como o programa CREARRAY produz a curva característica

O programa Crearray utiliza um método gráfico-numérico para resolver todos os aspectos relacionados com as associações de dispositivos (módulos, células ou diodos), que trabalha com um vetor de pontos para representar a curva de cada módulo. O primeiro passo, logo depois de arquivar todas as informações fornecidas sobre o dispositivo, é calcular a curva característica da célula ou do módulo seguindo o modelo representado na Fig. 1, representando uma fonte de corrente fotogerada, um diodo, uma resistência paralela (R_p) e uma resistência série (R_s).

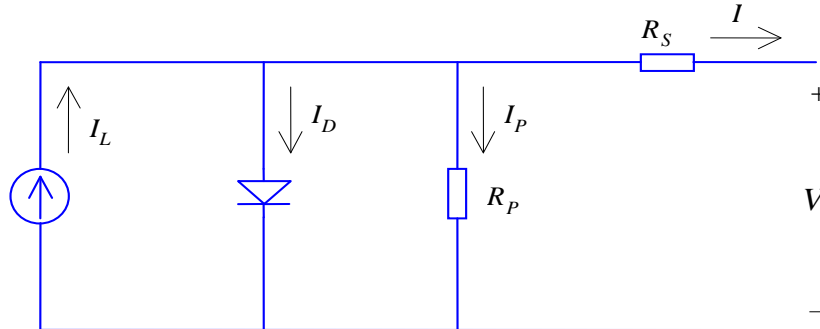


Figura 1 – Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica (modelo de um diodo).

Segundo o modelo da Fig. 1, a corrente do dispositivo (I) corresponde à corrente fotogerada (I_L) descontada das correntes do diodo (I_D) e da corrente da resistência paralela (I_P), resultando na Eq. (1), e a tensão do dispositivo (V) se relaciona com a tensão de junção PN (V_j) pela Eq. (2).

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (1)$$

$$V = V_j - I.R_s \quad (2)$$

onde a corrente do diodo é dada pela Eq. (3):

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_j}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_j}{R_p} \left[a \left(1 - \frac{V_j}{V_{br}} \right)^{-m} \right] \quad (3)$$

onde I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo; V_{br} é a tensão de ruptura por avalanche do diodo embutido na célula (*breakdown voltage*); a é a fração da corrente ôhmica envolvida na ruptura por avalanche e m é o expoente da ruptura por avalanche; V_t é uma expressão dada pela Eq. (4):

$$V_t = N_s \frac{nkT}{q} \quad (4)$$

onde n é o fator de idealidade do diodo, número adimensional entre 1 e 2; q é a carga do elétron; k é a constante de Boltzmann; T é a temperatura absoluta da célula e N_s é o número de células em série no módulo. A parte de tensão negativa representada na Eq. (3) foi inspirada na equação não-linear desenvolvida por Bishop (1988).

Em relação à Eq. (1), a corrente da resistência paralela é dada pela Eq. (5):

$$I_P = \frac{V_j}{R_p} \quad (5)$$

Para traçar uma curva característica completa I-V, basta lançar valores de V_j e calcular I e V pelas Eq. (1) e (2), mas para tanto seria necessário conhecer os parâmetros: I_L , R_s , R_p , I_0 , n , V_{br} , a e m para uma dada condição de temperatura de célula e irradiância solar. Este problema é bem conhecido pelos pesquisadores que trabalham com modelagem de células fotovoltaicas e não tem uma solução analítica, mas algumas aproximações tornam possível um cálculo numérico para encontrar conjuntos de valores de parâmetros que façam os resultados da Eq. (1) coincidir com os resultados experimentais. Considerando apenas o quadrante das tensões positivas e assumindo inicialmente que I_L corresponde à corrente de curto circuito I_{SC} do dispositivo ($I_L = I_{SC}$) e com isto, na condição de circuito aberto ($I = 0$) pode-se demonstrar a Eq.(6):

$$I_0 = \frac{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p}}{\exp\left(\frac{V_{OC}}{V_t}\right) - 1} \quad (6)$$

em que V_{OC} é a tensão de circuito aberto. Além disto no ponto de máxima potência da curva característica do módulo, a derivada da potência em relação à tensão é nula:

$$\left. \frac{\partial [I(V)V]}{\partial V} \right|_{V=V_m} = 0 \quad (7)$$

e usando $\frac{\partial [I(V)V]}{\partial V} = V \frac{\partial I(V)}{\partial V} + I$ verifica-se que

$$\left. \frac{\partial I(V)}{\partial V} \right|_{V=V_m} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (8)$$

como a derivada da corrente em relação à tensão é

$$\frac{\partial I(V)}{\partial V} = \frac{\frac{I_0}{V_t} \exp\left\{\frac{V + I(V) \cdot R_s}{V_t}\right\} + \frac{1}{R_p}}{-\frac{I_0 \cdot R_s}{V_t} \exp\left\{\frac{V + I(V) \cdot R_s}{V_t}\right\} - \frac{R_s}{R_p} - 1} \quad (9)$$

substituindo a expressão dada pela Eq. (9) no lado direito da Eq. (8) obtém-se a Eq. (10):

$$R_p = \frac{V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s}{\frac{I_0}{V_t} \cdot \left[(I_{mp} \cdot R_s - V_{mp}) \cdot \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{V_t}\right) \right] + I_{mp}} \quad (10)$$

que por sua vez ao ser inserida na Eq. (1) resulta na Eq. (11)

$$R_s = \left\{ \frac{\left(\frac{V_{mp}}{I_{mp}}\right) - R_s}{\left[\frac{I_0}{V_t} \cdot (I_{mp} \cdot R_s)\right] \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{V_t}\right) + I_{mp}\right]} \right\} \left\{ I_L - I_{mp} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{V_t}\right) - 1\right] \right\} - \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (11)$$

Por um processo iterativo, o programa Crearray considera primeiro as condições padrão e, a partir de informações adequadas dos pontos de curto circuito, circuito aberto e máxima potência determina os valores de R_s , R_p e n para cada células de um módulo, considerando-as todas iguais. Para isto as Eq.(6), (10 e (11) são repetidas até formar um conjunto de parâmetros R_s , R_p e n que solucionam a Eq.(1) de forma que o ponto de máxima potência seja correspondente ao informado. Depois de alcançar este resultado o quadrante de tensões negativas do dispositivo é resolvido com valores de V_{br} , e m dados como valores fixados pelo usuário do software.

No caso de módulos fotovoltaicos as resistência R_s e R_p além de V_t são previamente multiplicados pelo número de células em série N_s . Havendo diodo de desvio a equação completa fica como descrita pela Eq. (12) Equação 4.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \left\{ \frac{V+IR_s}{R_p} \left[1 + a\delta_V \left(1 - \frac{V+IR_s}{V_{br}} \right)^{-m} \right] \right\} + \delta_{DBP} \{ I_{OB} \left[\exp\left(\frac{q(V_B)}{m_b k T_B}\right) - 1 \right] \} \quad (12)$$

onde:

δ_V – é uma função degrau que vale 1 quando a tensão é negativa e zero quando a tensão é positiva;

δ_{DBP} – é uma função que vale 1 na presença de diodo de bypass e zero em sua ausência;

I_{OB} – é a corrente de saturação reversa do diodo de bypass [A];

V_B – é a tensão do diodo de bypass [A];

m_b – é o fator de idealidade do diodo de bypass;

T_B – é a temperatura do diodo de bypass [K];

A partir dos valores das incógnitas encontradas em função de ensaio experimental de várias células fotovoltaicas, o programa de simulação retratará a curva I-V completa de uma célula, conforme indica a Equação 4, englobando tanto o comportamento diretamente polarizado, como inversamente polarizado, na falta de uma proteção adequada.

Ao atribuir uma nova condição de temperatura e irradiância, novos valores de tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito são atribuídos para refazer os cálculos, mas os parâmetros R_s , R_p e n são mantidos invariáveis. Os pontos são gerados pelas Eq. (1) e (2) e o processo de associação passa a ser totalmente numérico e geométrico, sem a utilização das equações mostradas até aqui.

2.2 Como programa CREARRAY associa as curvas características dos dispositivos

Se n células solares idênticas são conectadas em série, a corrente fornecida pela associação será a mesma que a fornecida por uma única célula, porém a tensão se incrementará em n vezes. Por outro lado, mesmo quando as células não são idênticas, ao lançar uma corrente em um conjunto de dispositivos em série, a corrente será igual para todos fazendo com que suas tensões se distribuam para garantir esta corrente e a tensão da associação será a soma das tensões individuais. Neste caso é útil considerar que as tensões são uma função das correntes $V(I)$ e que as correntes são uma função das tensões $I(V)$. No conjunto de pontos que formam as curvas dos dispositivos estas funções são automaticamente definidas, e para cada lançamento de corrente os resultados são os das Eq. (13) e (14).

$$I_{str} = I_1(V_1) = I_2(V_2) = I_3(V_3) = \dots = I_n(V_n) \quad (13)$$

$$V_{str} = \sum_{i=1}^n V_i (I_{str}) \quad (14)$$

Se n células idênticas são conectadas em paralelo, a associação mostrará a tensão de uma única célula, com uma corrente n vezes maior, e as tensões serão iguais. Mas mesmo quando as células (ou módulos) não são iguais, as resultantes podem ser obtidas das Eq. (15) e (16).

$$V_{par} = V_1(I_1) = V_2(I_2) = V_3(I_3) = \dots = V_n(I_n) \quad (15)$$

$$I_{par} = \sum_{i=1}^n I_i (V_{par}) \quad (16)$$

O conjunto de pontos previamente produzido, associado com um procedimento de interpolação polinomial, permite assegurar a obtenção de funções inseridas no software para achar uma tensão em cada dispositivo em função de uma corrente solicitada e uma corrente em cada dispositivo em função de uma tensão predeterminada.

Esta técnica de lançar linhas de tensão ou de corrente para encontrar as resultantes permite inclusive inserir um conjunto de pontos que não tenham origem nas equações mencionadas na seção 2.1. O programa tem uma opção de inserir curva medida, que nada mais é do que um arquivo texto em formato ASCII, com os dados separados por vírgula em duas colunas, uma para tensão e outra para corrente. Fica com a imaginação e dedicação de cada usuário as aplicações possíveis deste dispositivo, mas o mais evidente seria utilizar curvas medidas de células para reproduzir a curva característica de associações diversas.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO

A completa descrição dos efeitos de descasamento elétrico em um módulo fotovoltaico requer a determinação de operação de corrente e tensão de cada célula. Como as células são encapsuladas em um módulo fotovoltaico, medições diretas em seus pontos de operação não são possíveis.

Em vista disso, foi escolhido um módulo comercial para ensaio, com 60 células associadas em série, de tecnologia de silício multicristalino, totalizando 265 W de acordo com a etiqueta do fabricante e dimensões de 0,991 x 1,65 m, incluindo a moldura. Para determinar as características elétricas das células, cada uma destas sofreu bloqueio total de iluminação, sendo assim efetuada a caracterização elétrica para obtenção da curva I-V.

A caracterização elétrica deste módulo fotovoltaico, com cada uma das células sofrendo bloqueio total de irradiância, foi realizada através de um simulador solar. O simulador solar conta com lâmpadas especiais para emular as propriedades da radiação solar durante o ensaio de determinação da curva característica de dispositivos fotovoltaicos.

O simulador solar utilizado neste experimento corresponde ao modelo SunSim 3C, fabricado pela empresa suíça PASAN, e adquirido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL/UFRGS). Este possui iluminação uniforme em um plano de 2,0 x 2,0 m, área suficiente para a grande maioria dos 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+. Maiores informações sobre este simulador solar SunSim 3C podem ser encontrados em 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) também se encontram os motivos que levaram a escolha de compra deste simulador em questão.

Os ensaios de medição foram realizados nas condições padrão de teste, em inglês *Standard Test Conditions* (STC), com irradiância de 1000 W/m², mantendo a temperatura de célula em 25°C, com variação de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ em alguns experimentos individuais.

O módulo fotovoltaico escolhido possuía 3 diodos bypass de proteção, em que cada diodo contemplava um total de 20 células em série, porém como o intuito deste trabalho é analisar as características da corrente da ruptura por avalanche, estes diodos foram removidos da caixa de conexão.

Como método de análise, as 60 células associadas em série foram identificadas conforme a numeração apresentada na Fig. 2. Foram realizados diversos ensaios com cada uma das 60 células, as quais foram submetidas a bloqueio total de luz através de papel plástico preto e fita isolante, conforme indica a Fig. 3, que demonstra o módulo fotovoltaico com a célula 4 totalmente bloqueada.

Utilizando este sombreamento individual, foram obtidas 60 curvas I-V, correspondente a cada célula com bloqueio de luz. A Fig. 4 apresenta a curva I-V do módulo fotovoltaico com a célula 4 sofrendo bloqueio de luz, juntamente com a curva I-V do módulo sem nenhuma interferência.

A curva I-V apresentada para a célula 4 com bloqueio de irradiância possui o mesmo comportamento das curvas I-V de todas as células do módulo fotovoltaico de ensaio. Pequenos desvios são encontrados entre uma curva e outra. A curvatura que aparece com tensão de +10 V na Fig. 4 é fruto de limitação de corrente pelo método utilizado. Como pode ser observado, tanto a corrente do módulo sem bloqueio quanto a corrente do módulo com uma célula bloqueada tem a mesma limitação na corrente de curto circuito. Isto ocorre porque a fonte de energia na medida da corrente de ruptura é fornecida pelo próprio módulo fotovoltaico.

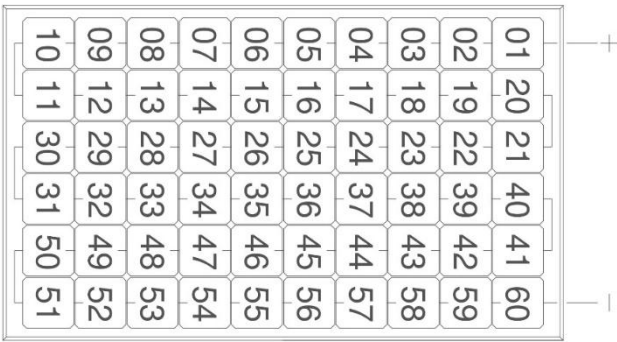


Figura 2 – Sequência numérica das células fotovoltaicas adotadas no experimento.



Figura 3 - Módulo fotovoltaico com célula 4 com bloqueio de irradiância.

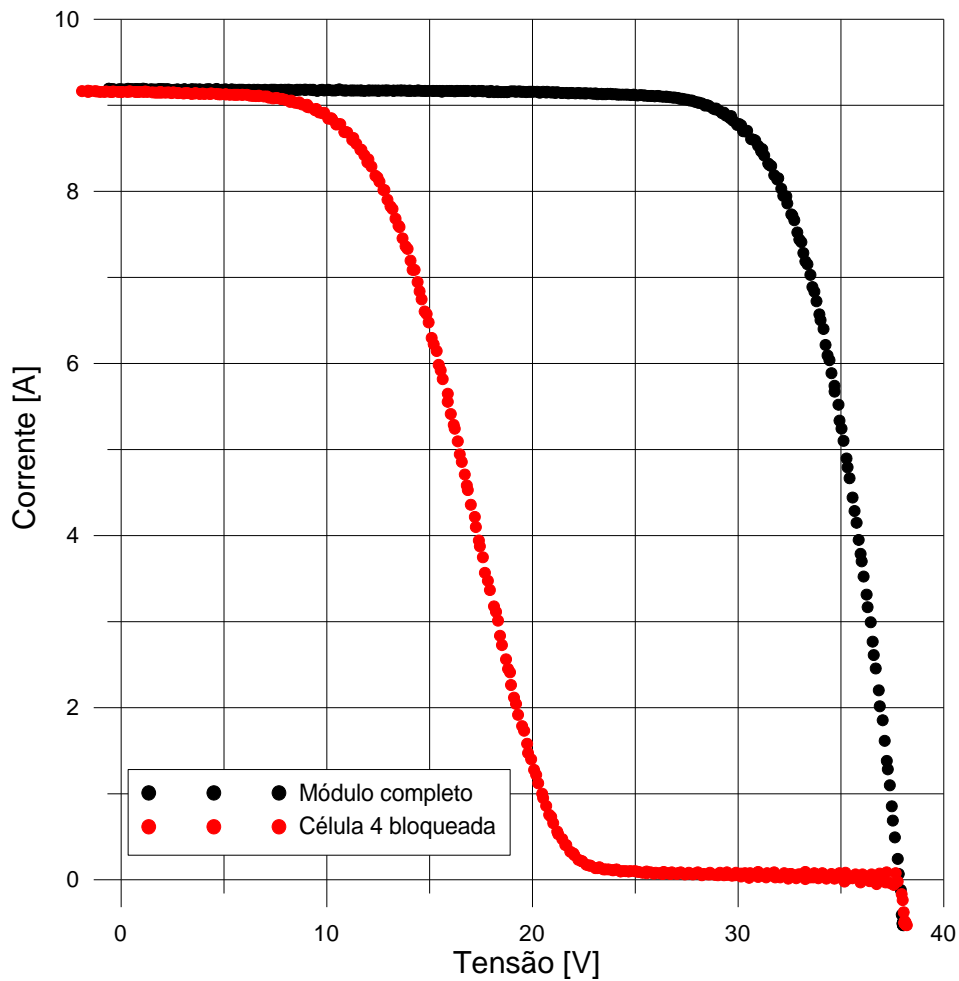


Figura 4 - Comparação das curvas I-V do módulo completo em relação a célula 4 sombreada sem a presença de diodos bypass.

Para determinar a curva da célula que foi bloqueada, uma modelagem de deslocamento dos pontos foi realizada, para que assim uma curva I-V do módulo com bloqueio de luz, como a apresentada na Fig. 4, se transformasse em uma curva I-V representativa de cada célula, englobando a parte de polarização reversa onde se percebem as correntes de ruptura por avalanche.

A Fig. 5 mostra o resultado deste procedimento com uma amostragem de 4 células modeladas. Observa-se que o efeito da corrente de ruptura por avalanche ocorre na célula entre as tensões de -15 a -23 V.

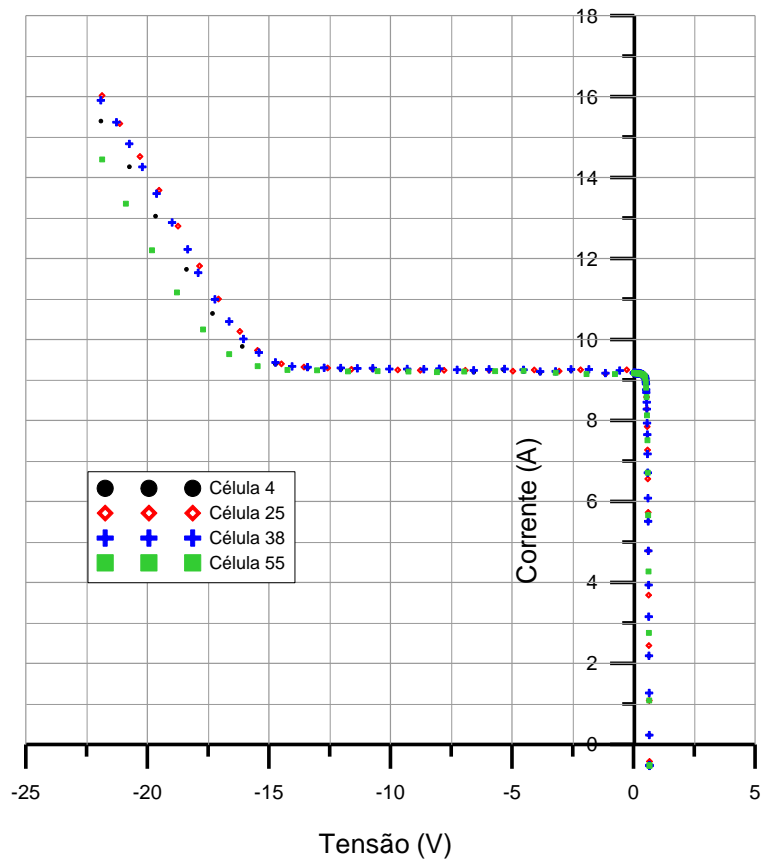


Figura 5 – Curva I-V de 4 células fotovoltaicas modeladas em toda a faixa de tensão.

A partir das curvas I-V, como na amostragem apresentada na Fig. 5, é possível, através de métodos iterativos e utilizando a modelagem proposta por Bishop (1988), encontrar os valores das constantes de corrente de ruptura e tensão de ruptura que mais se adequam às células fotovoltaicas do módulo comercial de ensaio. Obtendo-se tais valores, estes são inseridos no programa computacional Crearray, para que seja possível analisar visualmente o efeito de polarização reversa para células comerciais atuais, sendo uma ferramenta didática útil para o aprendizado e conhecimento do funcionamento de uma célula fotovoltaica e suas possíveis associações.

4. RESULTADOS

Seguindo a metodologia de ensaio no módulo com os diodos de bypass removidos, as 60 células bloqueadas individualmente foram ensaiadas no simulador solar e todas apresentaram perfil similar ao da curva I-V apresentada na Fig. 4. Para determinar os parâmetros da modelagem da corrente de ruptura, foi utilizado um método iterativo e os valores que mais se aproximaram ao ajuste das curvas I-V das células amostradas são os apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Valores de a , V_{br} e m encontrados experimentalmente.

	a - fração da corrente ôhmica envolvida na avalanche de ruptura	V_{br} – tensão de ruptura [V]	m – expoente da avalanche de ruptura
Valores experimentais	0,06	24	-9

Depois de determinados os valores dos parâmetros do segundo termo da Eq. (3), os mesmos foram inseridos no programa de simulação de associações Crearray e a curva correspondente a uma célula nas condições STD é apresentada na Fig. 6. Uma parte da corrente reversa nos primeiros 10 V de polarização negativa é essencialmente causada pela resistência paralela. Já na faixa entre -15 e -25 V fica bem perceptível o efeito da ruptura por avalanche.

Na Fig. 7 apresenta-se uma aplicação dos resultados do software com os parâmetros de ruptura medidos. As Fig. 7(a) e 7(b) mostram as curvas características de um módulo com 265Wp e 60 células, onde apenas uma delas foi parcialmente sombreada, deixando penetrar a irradiância conforme indicada nas diferentes curvas características, com intensidades de 20, 200, 400, 600, 800 e 1000 W/m². As demais 59 células recebem todas irradiância de 1000 W/m². Na Fig. 8(a) o módulo foi analisado com diodos de desvio abraçando cada 20 células, como é usual em módulos de 60 células.

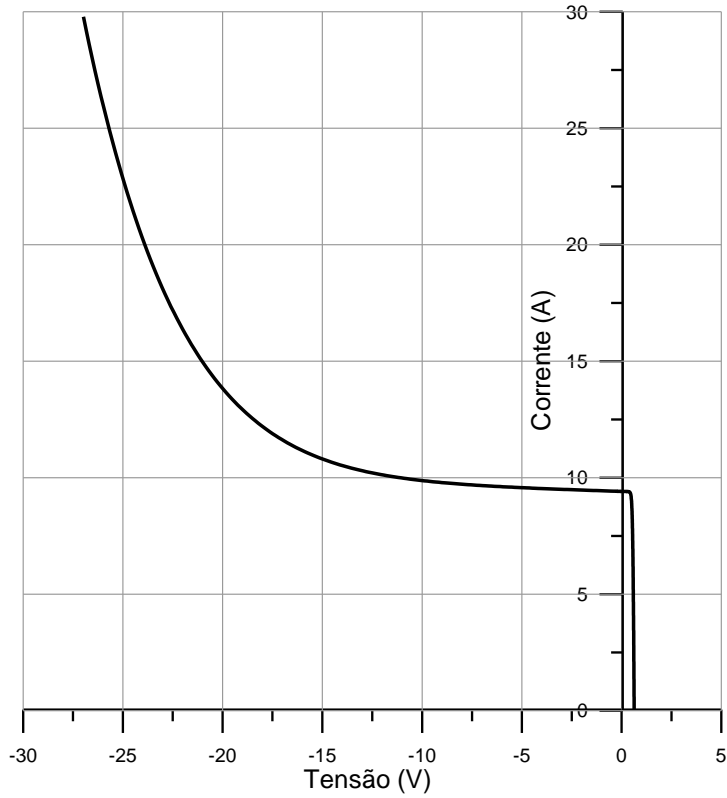


Figura 6. Curva completa de uma célula fotovoltaica apresentada pelo programa Crearray, utilizando os parâmetros de ruptura por avalanche determinados pela metodologia apresentada.

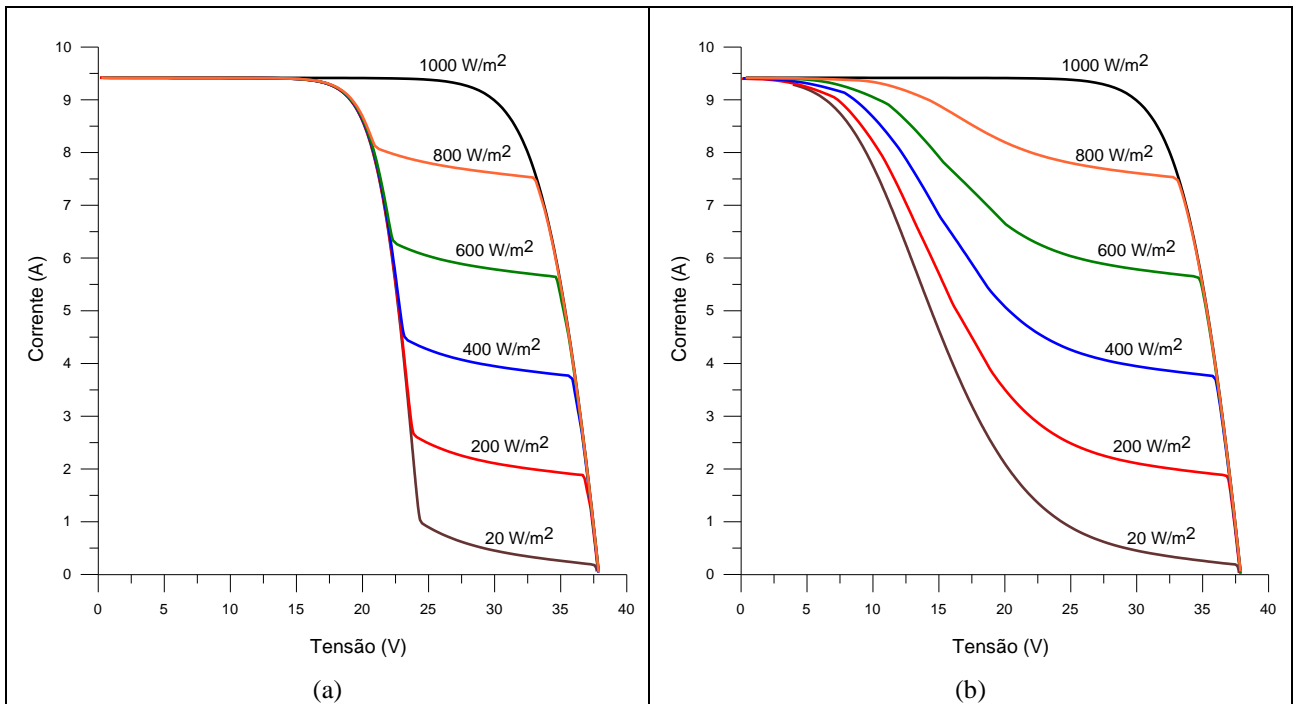


Figura 7. Curvas produzidas por análises do módulo fotovoltaico utilizando o Crearray (v3.0). (a) uma célula sombreada com utilização de diodos de desvio a cada 20 células. (b) uma célula sombreada sem a utilização de diodos.

5. CONCLUSÃO

A caracterização é um processo importante de avaliação do desempenho elétrico do dispositivo fotovoltaico, sendo a determinação da curva característica I-V o ensaio de maior relevância, cujo conhecimento é essencial para o

desenvolvimento da alta performance de um sistema fotovoltaico. Dentro deste contexto, a análise da parte inversa da curva I-V de células fotovoltaicas se faz necessária para compreender a forma como estas se comportariam em condições extremas de funcionamento, sem contar com nenhum tipo de proteção.

Uma ferramenta para avaliar o completo funcionamento da curva I-V de um dispositivo fotovoltaico ou mesmo de arranjos de módulos mais complexos é o programa Crearray, que tem por objetivo analisar o comportamento de associações de módulos fotovoltaicos, considerando efeitos de temperatura, irradiância e possíveis diferenças elétricas e sombreamentos nas células dos módulos que compõem a instalação, fornecendo a curva característica I-V da instalação considerada pelo usuário.

Na sua versão 3.0 este software agrega o efeito de ruptura por avalanche nas células, mas para dar um resultado realista, de acordo com as células comerciais dos dias de hoje, foi necessário analisar experimentalmente os parâmetros utilizados nas equações. Em vista disso, sessenta células fotovoltaicas com bloqueio de luz foram ensaiadas com o simulador solar do LABSOL/UFRGS e obtidas suas respectivas curvas I-V na região inversamente polarizada. A análise das curvas permitiu determinar os valores dos parâmetros da equação usada para calcular a corrente de ruptura. Esses parâmetros foram inseridos no programa Crearray possibilitando uma visibilidade completa do funcionamento de uma célula fotovoltaica nessas condições e de associações da mesma em um módulo fotovoltaico com ou sem diodos de desvio.

Conclui-se que os valores encontrados para os parâmetros estipulados de avalanche por ruptura se ajustaram bem para a simulação do comportamento encontrado no módulo ensaiado e acredita-se que estes parâmetros podem ser representativos de módulos com células de silício cristalino modernas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

REFERÊNCIAS

- Abdullah, K.A., Alloush, F.A., Jaafar, A., Salame, C., 2013. Study of the effects related to the electric reverse stress currents on the mono-si solar cell electrical parameters. *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 104-113.
- ANEEL, 2017. Geração Distribuída: Unidades consumidoras com geração distribuída. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 08 nov. 2017.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, L.A., 2001. Análise de associações de módulos fotovoltaicos. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Herrmann, W., Wiesner, W., Waassen, W., 1997. Hot spots investigations on PV modules—new concepts for a test standard and consequences for module design with respect to by-pass diodes, *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1129–1132.
- Hincapie, C., Picoli, L., Gasparin, F., Krenzinger, A. 2014. Estudo e Montagem de Túnel para Simulador Solar. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife.
- IEC 60904-9 ed.2.0. 2007. “Photovoltaic devices – Part 9: Solar Simulator Performance Requirements”.
- 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.
- Krenzinger, A., Adams, T.R., 2000. CREARRAY- Programa de análise de sistemas fotovoltaicos, Laboratório de Energia Solar – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Peroza, J., Rampinelli, G.A., Gasparin, F.P., Krenzinger, A., 2015. Ensaios de módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias com utilização de simulador solar. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 36, pp. 41-47.
- Saha, H., Bhattacharya, G., Mukherjee, D., 1988. Mismatch losses in series combinations of silicon solar cell modules. *solar cells*, v. 25, n. 2, pp. 143-153.

- Sidawi, J., Habchi, R., Abboud, N., Jaafar, A., Allouch, F.A., Moussa G.E., Aillerie, M., Petit, P., Zegaoui, A., Salame, C., 2011. The effect of the reverse current on the dark properties of photovoltaic solar modules. *Energy Procedia*, v. 6, pp. 743-749.
- 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.

AVALANCHE BREAKDOWN IN PHOTOVOLTAIC CELLS AND ITS IMPLICATIONS ON THE ANALYSIS OF ASSOCIATIONS WITH CREARRAY SOFTWARE

Abstract. *The characterization of photovoltaic (PV) devices is an important step in evaluating its electrical performance, in which the I-V curve determination is the most relevant test. In order to generate results for cell association in modules or array of modules it is necessary to know the I-V curve in its full extension. Bypass diodes are used to avoid damages to the PV systems due to power mismatch between cells associated in series. To determine how these diodes should be installed and their effect it is necessary to analyze the flowing currents in the system without these protective devices. This paper presents an analysis of the reverse current of PV cells that are submitted to avalanche rupture and their impact on the resultant of series association of cells in a module. IV curves of a module without bypass diodes and with one of its cells covered at a time were obtained using a solar simulator. With the resulting curves, parameters were determined to describe the avalanche rupture current. These values were inserted in the routine of the Crearray software. In version 3.0, and with the updated measured parameters, the software is able to simulate the resultants of modules and arrays with partial shading, allowing to compare situations with and without bypass diodes.*

Key words: *avalanche breakdown, photovoltaic cells, association of PV cells.*