

UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA SIMPLIFICADA PARA O TRATAMENTO DE CURVAS I-V OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Diogo Ferraz Costa – diogoferrazcosta@ufmg.br

Davies William de Lima Monteiro – davies@ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Este artigo contempla a elaboração de um modelo estatístico baseado no circuito elétrico equivalente clássico de células e módulos fotovoltaicos, de forma a melhorar a previsibilidade de grandes sistemas de geração por parte das concessionárias de energia. Utilizando ferramentas computacionais e matemáticas, assim como orientações provenientes de normas da IEC foi possível determinar uma curva característica que descreve suficientemente bem o comportamento de um dado módulo fotovoltaico dentro de determinada faixa de operação, a partir de experimento.

Palavras-chave: Energia Solar, Caracterização, Estatística

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas na caracterização de um módulo fotovoltaico é a dificuldade em encontrar um modelo que represente adequadamente seu comportamento frente ao sistema elétrico no qual está conectado (Castañer, 2002). No âmbito da microgeração distribuída a caracterização exata de um pequeno conjunto de módulos não é tão impactante para o consumidor, pois o objetivo é o abatimento na despesa de energia calculada por um medidor bidirecional, por exemplo.

Porém, para as concessionárias de energia que desejam diversificar sua matriz elétrica utilizando tecnologias fotovoltaicas, este é um assunto de primeira importância. Isso se deve ao fato de que o erro na previsibilidade na potência gerada por um módulo de determinado fabricante, pode significar uma grande perda de potência no caso da construção de uma usina fotovoltaica utilizando tal equipamento.

Algumas considerações devem ser feitas sobre o estado atual da caracterização fotovoltaica. É usual na indústria utilizar as informações disponíveis pelo fabricante (quando possível) nos *datasheets* de módulos para simular uma curva I-V genérica dos módulos e utilizar métodos gráficos para extrair os parâmetros correspondentes. Porém, os métodos gráficos nem sempre são suficientes pois podem envolver escolha de pontos das regiões onde dominam o efeito de difusão, deriva e da resistência série de forma arbitrária. Métodos como os baseados em derivadas (aproximação linear) fornecem boas estimativas, mas não levam em consideração a variabilidade estatística dos pontos de operação dado que o modelo é estático (tratado posteriormente).

Logo, este artigo trata da proposição de um novo método para tratar a caracterização de módulos fotovoltaicos incluindo uma análise estatística, assim como a utilização de procedimentos indicados por normas da IEC (*International Electrotechnical Commission*) e a ferramenta computacional MATLAB®.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelo elétrico equivalente

A unidade fundamental que constitui um módulo são as células fotovoltaicas. Em física de semicondutores, é usual considerar o modelo elétrico de uma célula fotovoltaica conforme a Fig. 1 (Castañer, 2002).

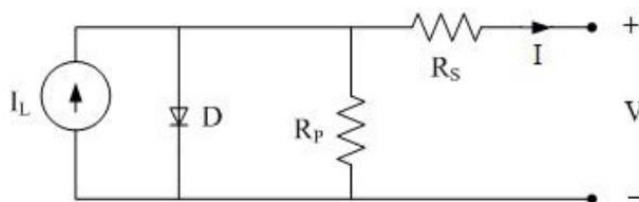


Figura 1 – Modelo elétrico equivalente clássico de uma célula fotovoltaica.

Ao fazer a análise nodal do circuito acima mostrado, é possível escrever a relação tensão-corrente descrita pela Eq. (1). Nota-se que foi utilizado o modelo de apenas uma exponencial (um diodo, em vez de dois), devido ao fato de que o medidor utilizado não tem boa resolução de escala para valores de tensão próximos de zero. Com isso, o número de pontos próximos à situação de curto-circuito é insuficiente para avaliar os parâmetros da segunda exponencial, sendo que seu efeito pode ser englobado pelo fator de idealidade n (Castañer, 2002). I_L é a corrente fotogerada, V_T é a tensão térmica, R_s é a resistência série, R_p é a resistência paralela (*shunt*), I_0 é a corrente de saturação do diodo, V é a tensão terminal e I é a corrente de saída. Vale ressaltar que os valores apropriados dos parâmetros da Eq. (1) e suas respectivas variações não estão incluídos no escopo deste trabalho, visto que a estatística a ser analisada tem como origem as medições da curva I-V, não os parâmetros determinados da mesma após a caracterização (explicitados na equação).

$$I = I_L - I_0 * \left(\exp\left(\frac{V+I*R_s}{n*V_T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V+I*R_s}{R_p} \right) \quad (1)$$

Como os módulos são construídos a partir da associação série e/ou paralelo de várias células, é comum utilizar o mesmo modelo elétrico equivalente de uma única célula e expandi-lo para o módulo completo. Vale ressaltar que a modelagem introduzida neste artigo é do tipo caixa cinza, pois não se sabe as peculiaridades do comportamento dos parâmetros do sistema e tenta-se estabelecer um modelo parcial baseado em experimentos. Neste caso, os parâmetros do modelo a serem determinados devem englobar os efeitos dessa associação de forma macroscópica. Isto geralmente é feito por dois motivos: primeiro pela limitação do número de malhas internas que as versões gratuitas dos softwares possuem (do tipo SPICE); segundo, pelo ganho computacional em velocidade de simulação ao se desprezarem os nós internos de conexão e analisar somente tensão e corrente terminais do módulo.

No entanto esta modelagem possui limitações. Apesar de descrever suficientemente bem o comportamento de células e módulos, este modelo é estático no sentido de que não compreende a variação de seus parâmetros com grandezas como temperatura e irradiância.

É diante deste fato que surgiu a motivação para este trabalho, de forma a encontrar uma curva característica do dispositivo que possa representar o comportamento do mesmo para uma dada variação de seus pontos de operação. O ponto de operação no qual o módulo irá operar é composto pelo balanço de carga-geração, ou seja, a carga vista pelos terminais do módulo, ou conjunto de módulos associados. Então, o mesmo será definido como a interseção entre a curva I-V do sistema fotovoltaico com o resistor de carga equivalente (representado por uma reta no plano I-V na Fig. 2). No exemplo abaixo, foi feito um ajuste de curva (linear) sobre os pontos obtidos através de medição de um módulo fotovoltaico disponível (especificado posteriormente). Além disso, foi inserido um resistor de carga fictício com o valor ôhmico correspondente à operação no ponto de máxima potência.

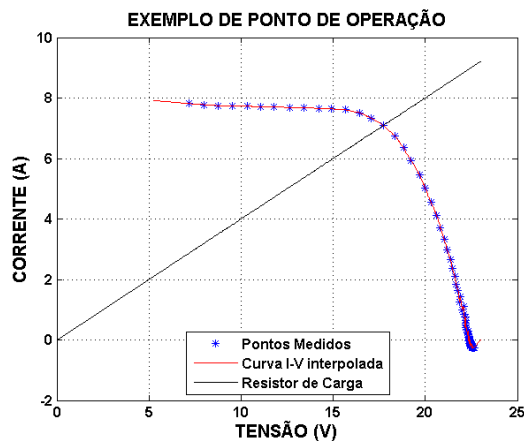


Figura 2 – Exemplo de ponto de operação.

2.2 Descrição experimental

No dia 14/01/2015 foram realizadas medições da curva IxV de um módulo Kyocera KD140SX-UFBS, assim como da temperatura do mesmo e irradiância incidente. O experimento foi realizado na Escola de Engenharia no campus Pampulha da UFMG, latitude 19°52'09.1" S, longitude 43°57'40.5" O, a uma altitude de 812 metros acima do nível do mar. Durante aproximadamente 1h20min de experimentos (de 10h26min até 11h46min da manhã) foram extraídas 19 curvas utilizando o equipamento PVA-600.

O Photovoltaic Analyzer 600 é um equipamento no qual se conecta o módulo fotovoltaico e após sincronizar com o computador via software é capaz de extrair a curva IxV do mesmo, assim como temperatura e irradiância (através de sensores auxiliares). Alguns problemas foram encontrados ao utilizá-lo: a presença de poucos pontos próximos de 0 V, o que impossibilita a correta caracterização utilizando o modelo de duas exponenciais; os valores próximos à tensão de circuito aberto são muito ruidosos (provocará erros de interpolação tratados posteriormente).

Os dados principais do *datasheet* do fabricante estão especificados na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo KD140SX-UFBS sob irradiância 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C e espectro AM 1,5.

KD140SX-UFBS		
Potência Máxima	Pmp	140 W
Tensão de Máxima Potência	Vmp	17,7 V
Corrente de Máxima Potência	Imp	7,91 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	Voc	22,1 V
Corrente de Curto Circuito (Isc)	Isc	8,68 A
Coeficiente de Temperatura (Voc)	β	-0,36 %/°C
Coeficiente de Temperatura (Isc)	α	0,060 %/°C

2.3 Ajuste das medições

Na Fig. 3 estão colocadas as 19 curvas IxV obtidas no experimento descrito anteriormente. Pode-se perceber que, como cada uma delas foi obtida em temperaturas e irradiâncias diferentes, as curvas estão deslocadas. O aumento na irradiância leva a um aumento significativo na corrente e um pequeno aumento na tensão de circuito aberto. O aumento da irradiância também resulta em um aumento da temperatura do módulo. Sabe-se que o aumento da temperatura, leva a um pequeno aumento na corrente de curto circuito e a uma queda mais expressiva na tensão de circuito aberto. O efeito de flutuação da irradiância e da temperatura combinados levam ao conjunto de curvas obtidos ao longo do intervalo de coleta de dados especificado no item 2.2. A Tab. 2 mostra essa flutuação, cujos valores também foram obtidos pelos sensores auxiliares de irradiância e temperatura do PVA-600. Além disso, ocorreram pequenas mudanças espectrais no intervalo devido à natureza aleatória das condições de medição (principalmente relacionadas ao clima). Porém, este efeito é visto pelo módulo como variações de irradiância espectral (consequentemente irradiância) e temperatura, que eletricamente mostram seu comportamento alterando os valores de corrente e tensão da curva característica.

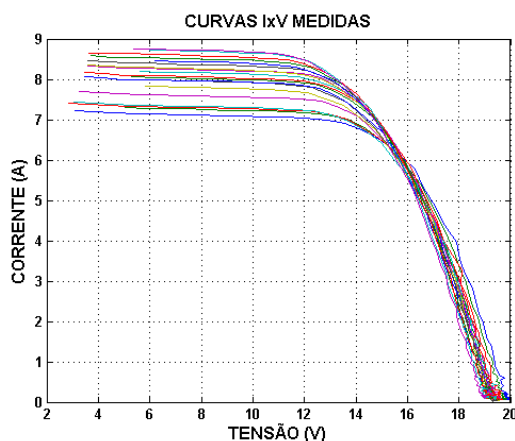


Figura 3 – Curvas IxV medidas experimentalmente.

Tabela 2 – Variação da Irradiância, Temperatura e Resistência Série no intervalo de medição.

Hora de medição (manhã)	Irradiância (W/m ²)	Temperatura (°C)	Resistência Série (mΩ)
10:26	896,9	47,8	30,0
10:30	915,8	52,8	59,9
10:34	918,8	57,2	59,9
10:38	919,7	60,0	59,9
10:45	964,3	62,8	59,9
10:53	989,7	64,4	59,9
10:57	1006,7	65,0	59,9
11:01	1008,0	65,6	59,9
11:04	1013,9	63,9	59,9
11:08	1018,7	63,9	59,9
11:12	1029,9	64,4	59,9
11:16	1038,1	66,1	59,9
11:20	1038,1	66,1	59,9
11:24	1051,3	68,9	59,9
11:28	1064,1	69,4	59,9
11:32	1072,7	70,6	59,9
11:37	1079,1	71,1	59,9
11:42	1091,1	70,6	59,9
11:46	1093,5	74,4	59,9

Utilizando a norma da IEC-60891, ajustam-se todos os pontos de todas as curvas medidas para a condição padrão de testes (STC), na qual a irradiância é de 1000 W/m² e a temperatura é de 25 °C (Fig. 4). Vale ressaltar que o primeiro procedimento de ajuste descrito na norma (que foi utilizado neste trabalho) consiste na aplicação de coeficientes de temperatura constantes (um para a tensão e um para a corrente). Porém, fisicamente isso mascara o efeito da diminuição da resistência série parasita do módulo, que terá impacto em sua eficiência. No entanto, essa aproximação é válida ao tentar-se fazer com que o dispositivo funcione como um diodo, cuja resistência aumenta com a temperatura, enquanto operando na região extrínseca (Sze, 2002).

O primeiro procedimento descrito na norma da IEC mencionada contempla o ajuste de cada ponto de corrente e de tensão segundo as Eq. (2) e (3).

$$I_{STC} = I + I_{SC} * \left[\left(\frac{1000}{G} \right) - 1 \right] + \alpha * (25 - T) \quad (2)$$

$$V_{STC} = V - R_S * (I_{STC} - I) - \kappa * I_{STC} * (25 - T) + \beta * (25 - T) \quad (3)$$

Onde I_{STC} e V_{STC} são os pontos de corrente e de tensão ajustados para a condição padrão de testes, I e V são os pontos medidos das curvas $I \times V$, α é o coeficiente de temperatura para I_{SC} (corrente de curto-circuito), β é o coeficiente de temperatura para V_{OC} (tensão de circuito aberto), T é a temperatura em graus Celsius, R_S é a resistência série e κ é um parâmetro de ajuste de curva (obtido através do procedimento 6.2 da norma IEC 60891). A resistência série utilizada na Eq. (3) foi obtida através da medição do PVA-600 (que também fornece esse dado).

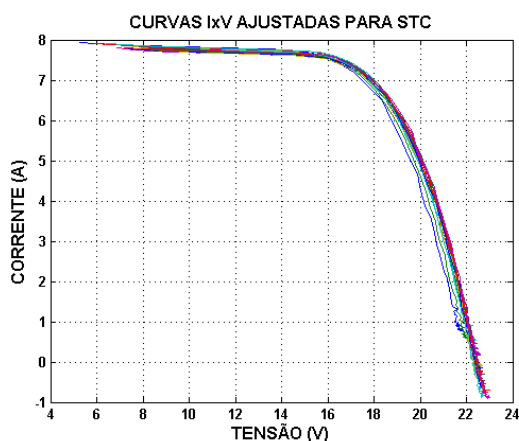


Figura 4 – Curvas IxV ajustadas para o STC.

2.4 Curva média e desvios-padrão

O primeiro fato que se deve notar é que em cada uma das 19 curvas medidas, os valores de tensão nos quais a corrente é medida são diferentes para cada caso (por exemplo, o primeiro ponto de tensão da primeira curva começa em 3 V e o da segunda curva começa em 4 V). Com isso, é difícil avaliar a variabilidade dos dados de forma estatística, pois seria necessário que cada ponto em cada curva fosse amostrado nos mesmos valores de tensão.

As Eq. (4) e Eq. (5) abrangem a notação matricial do que ocorre com os vetores de tensão (que ocorre analogamente nos vetores de corrente). Sejam V_1 e V_2 os vetores contendo os valores de tensão correspondentes à primeira e segunda medidas respectivamente. Logo, V_{1n} é o n ésimo valor de tensão medido da primeira curva. Nos experimentos realizados, V_{11} é diferente de V_{21} , o que impossibilita a comparação dos valores de corrente correspondentes para tratamento estatístico.

$$V_1 = [V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1n}] \quad (4)$$

$$V_2 = [V_{21}, V_{22}, \dots, V_{2n}] \quad (5)$$

Tendo isto em mente, utilizando a ferramenta MATLAB, foi criado um vetor contendo todos os valores de tensão de todas as 19 curvas concatenadas (1881 pontos – 99 por curva), como descrito pela notação da Eq. (6).

$$V_{TOTAL} = [V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1n}, V_{21}, V_{22}, \dots, V_{2n}, \dots, V_{19n}] \quad (6)$$

Percebeu-se que de cada conjunto de 99 pontos, algumas medições são repetidas, i.e. pares de valores IxV duplicados (ex. $V_{14} = V_{15}$). O vetor da Eq. (6) foi cuidadosamente ordenado e os pontos “repetidos” foram excluídos, para um novo total de 1686 valores de tensão. Então, pôde-se interpolar linearmente esses valores em cada uma das 19 curvas já ajustadas para o STC, de forma a garantir que cada uma das curvas agora contenha 1686 pontos (Fig.5).

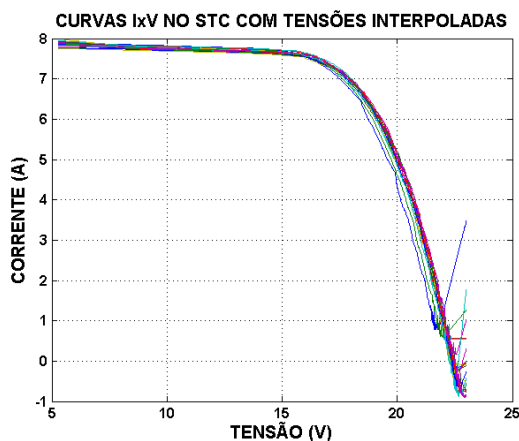


Figura 5 – Medições no STC após interpolação para todos os valores de tensão.

Nota-se que o final da maioria das curvas apresenta uma reta crescente. Isto se deve ao fato que o vetor de tensões contendo a totalidade dos pontos (V_{TOTAL}) vai além das tensões máximas medidas para uma ou outra curva. Logo após interpolar o último valor, passa-se a fazer uma extrapolação linear, que não apresenta resultado satisfatório com relação ao comportamento do painel pois o final das curvas medidas, i.e. próximo à tensão de circuito aberto, é bastante ruidoso devido aos pequenos valores de corrente medidos pelo equipamento. Porém, após a etapa seguinte, pode-se filtrar esse erro de extrapolação pelo desvio-padrão estimado, que apresentará valores discrepantes comparados com o resto da curva.

Cada ponto de tensão-corrente é então modelado como uma variável aleatória com função densidade probabilidade do tipo t-Student, pois trata-se de uma amostra de uma população normalmente distribuída (no caso, 19 amostras de corrente para cada valor de tensão).

Segue-se agora o processo de extrair o valor médio em cada ponto de tensão avaliado, gerando a curva média da amostra, descrita na Fig. 6. Foram calculados os desvios-padrão estimados para alguns valores específicos de tensão (de 6 V a 20 V), de forma a observar graficamente a variabilidade dos dados.

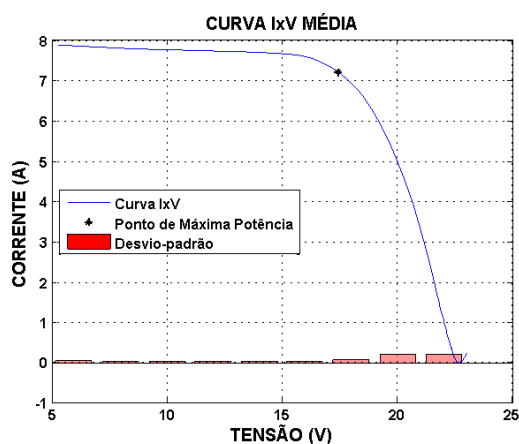


Figura 6 – Curva IxV média e barras de desvios-padrão.

É possível perceber que os desvios-padrão estimados da curva são pequenos até aproximar-se da tensão de circuito aberto, que coincide com a área mais ruidosa das medições, assim como a região onde ocorreu a extrapolação linear indevida. Nota-se que é possível utilizar o desvio-padrão não somente como fator de confiabilidade, mas como critério de escolha de pontos para uma possível filtragem.

Para efeitos de comparação, foi feita uma abordagem diferente da obtenção da “curva-média”. Primeiramente, todos os valores de tensão e corrente das 19 curvas ajustadas para o STC foram alocados cada um em um único vetor e foram devidamente ordenados (Fig. 7).

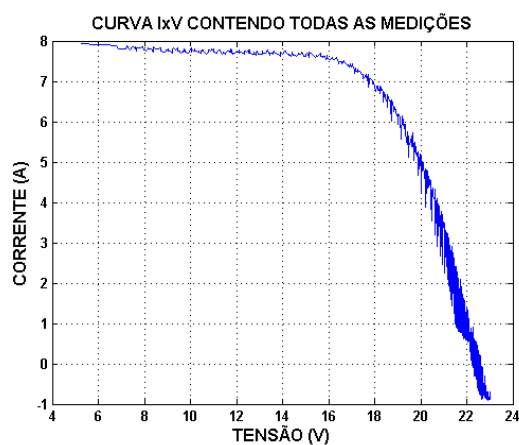


Figura 7 – Curva IxV ajustada para o STC com todos os pontos das 19 medidas.

A Fig.8 mostra a curva mostra a mesma curva da Fig. 7 filtrada por um método robusto de regressão local Gauss-Legendre, utilizando método dos mínimos quadrados ponderados com um modelo de polinômio de 2º grau. Percebe-se que, ao suavizar-se a curva utilizando este filtro, o erro percentual com relação ao valor medido é bem reduzido,

sobretudo na região próxima ao ponto de máxima potência (1,57% /113 mA), onde preferencialmente o módulo operará. Os percentuais de erro são referentes ao eixo vertical direito.

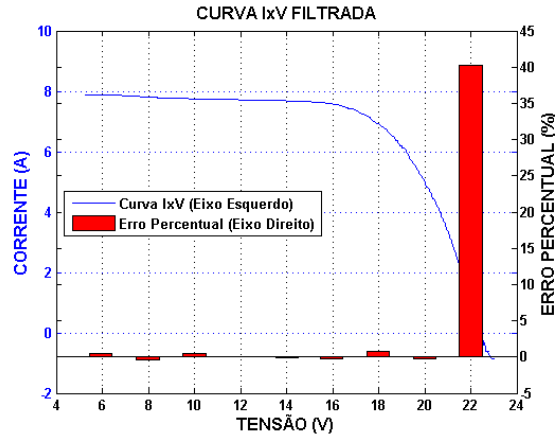


Figura 8 – Curva IxV com filtro de suavização

A partir do gráfico da Fig. 6 foi retirado o valor do desvio-padrão experimental da média (σ) no ponto de máxima potência (53,6 mA) e percebe-se que é bem reduzido. Se considerarmos que para a mesma função densidade de probabilidade t-Student com 18 graus de liberdade, temos que aproximadamente 99% da amostra está distribuída até em torno de $2,8\sigma$ (~150 mA). Pode-se concluir que o erro obtido ao se utilizar o filtro está compreendido no intervalo de confiança da medição, validando a metodologia.

2.5 Incerteza-padrão

O cálculo da incerteza de medição (u_A) de corrente para cada valor de tensão das 19 amostras pode ser feito por uma avaliação do Tipo-A (Eq.7), onde σ^2 é a variância experimental da média e N é o número de medições (no caso, 19). Os resultados estão mostrados na Fig. 9 para os mesmos valores de tensão de interesse.

$$u_A = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} \quad (7)$$

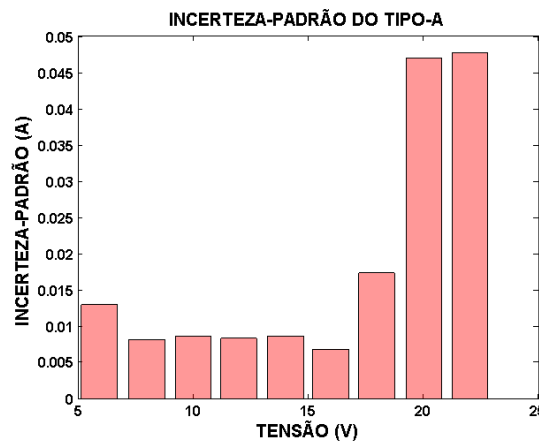


Figura 9 – Incerteza-padrão do Tipo-A

O gráfico acima é bastante rico para questões de modelagem, pois a variabilidade estatística dos dados medidos permite que a mesma curva I-V seja caracterizada por não somente um conjunto estático de parâmetros, mas que eles também possam variar individualmente dentro de uma faixa desde que os limites da incerteza de medição não sejam violados. Por exemplo, pode-se encontrar mais de um par de valores de resistência série (R_s) e fator de idealidade (n) que ajustem a mesma curva média dada uma certa tolerância, que pode ser estabelecida pelos limites da variabilidade dos dados medidos (Bueno, 2016).

3. PROPOSIÇÕES FUTURAS

Após a determinação de uma curva IxV média que representa bem o comportamento elétrico do dado módulo, é possível utilizar técnicas de otimização de forma a encontrar iterativamente os parâmetros do circuito equivalente mencionados no item 2.1. Isso será feito utilizando processos de minimização do erro RMS da curva gerada para a curva característica em conjunto com uma análise de confiabilidade do resultado a partir do desvio-padrão calculado para cada ponto de operação.

Além disso, será feita a inclusão deste método proposto em um software ainda em desenvolvimento que abrangerá não somente a natureza estatística das medições, como técnicas de algoritmos evolucionários e redes neurais, de forma a encontrar qual é o modelo elétrico do módulo fotovoltaico que melhor representa a operação do mesmo. Assim, este modelo gerado poderá ser incluído no projeto de sistemas fotovoltaicos maiores e mais completos, conectados à rede.

Então, ao se aplicar esse método para um conjunto variado de tecnologias de módulos fotovoltaicos, será possível determinar quais deles são viáveis para o investimento das concessionárias (custo/benefício), assim como vantagens e desvantagens na utilização de cada um sob a perspectiva de engenharia (eficiência, rendimento, fill fator, potência, entre outros).

4. CONCLUSÃO

Ao longo deste artigo, foi feita a proposição de uma nova técnica para incluir flutuações estatísticas provenientes de medições no processo de caracterização de módulos fotovoltaicos. Para justificá-la, foi feita a comparação da mesma com uma análise estatística básica, envolvendo a distribuição t-Student. Com isso, ao se representar um módulo fotovoltaico pela sua curva I-V média, é possível inserir esses dados ajustados em um software dedicado à caracterização de forma a obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente que sejam consistentes com a operação real do equipamento. Logo, as flutuações estatísticas da geração contribuem para a elaboração de um modelo mais fiel do dispositivo, permitindo análises mais sensíveis na operação em tempo real.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao CNPq, FAPEMIG e CEMIG, através do projeto D-470 CEMIG/UFMG, que financiou essa pesquisa. Também gostaria de agradecer à Poliana Bueno e Alexander Eick pelo incentivo na pesquisa de tecnologia fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- ABNT e INMETRO. Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. 3ª Edição Brasileira.
- Bueno, P.H., Costa, Carvalho, A.C., Costa, D.F., Eick, A., Monteiro, D.W.L. The Behavior of Series Resistance of P-N Junction: the Diode and the Solar Cell Cases. SPIE Photonics West, 2016.
- Castañer, L., Silvestre, S., 2002. Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice. Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona.
- Filho, F.F.C., 2007. Algoritmos Numéricos, 2ª Edição.
- International Electrotechnical Commission (IEC). International Standard 60891. Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. 2ª Edição, 2009.
- KYOCERA Solar, Inc. Datasheet KD140SX-UFBS: High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module.
- Pinho, J.T., Galdino, M.A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos – CEPEL/CRESESB
- Sze, S.M., Semiconductor Devices: Physics and Technology. 2ª Edição.

A SIMPLIFIED STATISTICAL APPROACH ON EXPERIMENTALLY OBTAINED I-V CURVES FROM PHOTOVOLTAIC DEVICES

Abstract. *This article includes the elaboration of a statistical model based on the classic equivalent electrical model of photovoltaic cells and modules, to improve the predictability of large power generation systems of energy companies. Using mathematical and computational tools, as well as instructions from IEC standards it was possible to determine a characteristic curve that describes well enough the behavior of a given photovoltaic module within a certain operation range, from experiments.*

Key words: *Solar Energy, Characterization, Statistics*