

## PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA COMPARAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

A. J. Bühler, A. Krenzinger

Laboratório de Energia Solar – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) Rua Sarmento Leite, 425 CEP 90050-170, Porto Alegre – RS - Brasil  
Tel. 55 (51)-3308-6841 e-mail: [ajbuhler@gmail.com](mailto:ajbuhler@gmail.com)

**RESUMO:** Uma comparação qualitativa entre duas ou mais curvas características de dispositivos fotovoltaicos pode ser feita visualmente bastando que para isso as curvas sejam superpostas. Por outro lado, para uma análise quantitativa das diferenças entre duas curvas obtidas experimentalmente é necessário que existam valores iguais de tensão medidos, de forma que as correntes ou potências associadas possam ser comparadas. Obter experimentalmente (dentro das imprecisões envolvidas nas medidas) os mesmos valores de tensão para duas curvas características diferentes é algo muito difícil de ocorrer. Este trabalho apresenta um método de comparação de curvas  $I-V$  medidas para células, módulos ou *arrays* fotovoltaicos. O método de comparação consiste em reproduzir matematicamente duas curvas a serem comparadas, com alto grau de fidelidade, a partir de múltiplas regressões lineares de forma que uma análise quantitativa possa ser feita.

**Palavras chave:** Módulos fotovoltaicos, curva característica  $I-V$ , translação de curvas  $I-V$ , caracterização de módulos fotovoltaicos.

### INTRODUÇÃO

Para a caracterização de um dispositivo fotovoltaico é de fundamental importância a determinação de uma curva característica ( $I-V$ ) de corrente por tensão. Através desta curva importantes informações sobre o desempenho do dispositivo podem ser obtidas, tais quais a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e o par tensão-corrente relativo à máxima potência que o dispositivo é capaz de fornecer para uma dada condição de temperatura e irradiância.

A comparação entre curvas características pode ser muito útil quando se comparam módulos de um mesmo modelo buscando quantificar as diferenças existentes entre os mesmos. Dessa forma é possível verificar a diferença entre a potência que cada módulo é capaz de fornecer ao longo de sua curva característica e não apenas no ponto de máxima potência, uma vez que ocorrem casos em que curvas bastante diferentes possuem o mesmo valor de máxima potência. Vale ressaltar que a potência fornecida por módulos fotovoltaicos comerciais é muitas vezes inferior ao que os fabricantes informam, tal como observado em Jacobson *et al.*, (2000), embora existam algumas marcas, que apresentam módulos com potência superior à indicada no catálogo.

No caso de comparar um conjunto de módulos de mesmo modelo, isto pode ser feito comparando todos os módulos com uma curva padrão que pode ser gerada matematicamente com os valores, fornecidos pelo fabricante, de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e máxima potência. A geração de uma curva característica a partir dos dados de catálogo pode ser feita utilizando algoritmos adequados, presentes, por exemplo, no software CREARRAY, desenvolvido por Krenzinger e Adams (1999).

Comparar curvas características de dispositivos fotovoltaicos também pode ser útil para analisar a eficiência de um método de translação. Existem inúmeros métodos de translação de curvas  $I-V$  dos quais se podem citar os métodos estabelecidos pelas normas americana (ASTM E 1036-02, 2002) e internacional (IEC-891, 1987) além de métodos alternativos, alguns dos quais descritos em Bühler e Krenzinger (2008) e Tsuno *et al.*, (2006). Para analisar o quão confiável ou eficiente é um método de translação, primeiramente é necessário que uma curva na condição para a qual será feita a translação tenha sido medida. Esta curva corresponde a um padrão com o qual a curva transladada é comparada.

Uma comparação qualitativa entre duas ou mais curvas características pode ser feita visualmente apenas superpondo as curvas. Por outro lado, para uma análise quantitativa das diferenças entre duas curvas medidas é necessário que existam valores iguais de tensão para que as correntes ou potências possam ser comparadas. Uma vez que as curvas  $I-V$  tenham sido medidas com varredura por rampa de tensão, (Gasparin, 2009), obter experimentalmente (dentro das imprecisões envolvidas nas medidas) os mesmos valores de tensão para duas curvas diferentes é algo muito difícil de ocorrer. Dessa forma, este trabalho propõe uma técnica capaz de obter por múltiplas regressões polinomiais, através do método de mínimos quadrados, pontos com valores de tensão iguais nas duas curvas a serem comparadas. Com esses pontos, ambas as curvas são reconstruídas e fica então possível comparar suas correntes ou potências ao longo de todo o primeiro quadrante.

Foi desenvolvida uma metodologia de análise matemática para que duas curvas possam ser comparadas levando em conta a diferença entre suas formas, desde a região de curto-circuito até a região de circuito aberto. De forma simples, esta metodologia consiste nas seguintes etapas:

- 1) Uma das duas curvas a serem comparadas é tomada como referência. A curva é dividida em intervalos de tensão e para cada intervalo é aplicada uma regressão linear da qual resulta um ponto com o valor de tensão desejado. São gerados pontos suficientes de forma a reproduzir uma nova curva, que possua a mesma forma da original. Esta curva é chamada de *curva de referência*.
- 2) A outra curva que está sendo comparada também é reconstruída a partir de pontos gerados por polinômios. Tais pontos devem possuir a mesma tensão dos pontos da curva de referência e devem ser gerados por polinômios de mesmo grau que originaram a curva de referência.
- 3) As duas curvas geradas matematicamente são comparadas, uma vez que possuem pontos com a mesma tensão. Esta comparação pode ser feita tanto pela corrente como pela potência. Um desvio médio ou médio quadrático pode ser calculado de forma a quantificar a diferença entre as correntes ou potências das curvas.

## GERAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS ATRAVÉS DE REGRESSÕES POLINOMIAIS

### Geração da curva de referência

- a) Primeiramente os pontos medidos na curva de referência compreendidos entre a tensão igual a zero e a tensão de circuito aberto são contados. Estes pontos são os utilizados para a análise da curva. Este processo é necessário sempre que a curva *I-V* medida possua valores medidos de tensão e ou corrente negativos.
- b) É então escolhido um “passo”. Este passo corresponde ao número de pontos que são utilizados em cada regressão linear e, portanto, em cada região de análise na curva. O passo a ser escolhido deve corresponder a um número ímpar (para que exista sempre um termo central em cada região de análise). O valor de tensão deste termo central é posteriormente utilizado para calcular um valor de corrente associado, resultando assim em um ponto gerado matematicamente para representar a curva *I-V*.
- c) Em seguida é calculado um “recuo”. O recuo corresponde à quantidade de pontos que são repetidos em uma região de análise e na região subsequente. Estes pontos sempre correspondem aos maiores valores de tensão pertencentes a cada passo, considerando que a análise é feita varrendo a curva do curto-circuito em direção ao circuito aberto. A adoção deste recuo faz com que as regiões que originam os polinômios tenham uma parte de superposição e isto melhora significativamente a qualidade da análise. O valor do recuo é definido pela equação (1).

$$BCK = \frac{STP}{2} - 1,5 \quad (1)$$

onde BCK e STP correspondem respectivamente ao recuo e ao passo de cada região de análise na curva *I-V*.

A figura 1 apresenta uma região próxima ao curto-circuito para uma curva transladada e uma curva medida na condição de translação onde é possível observar os pontos pertencentes a cada região de análise das curvas e os pontos gerados a partir das regressões lineares.

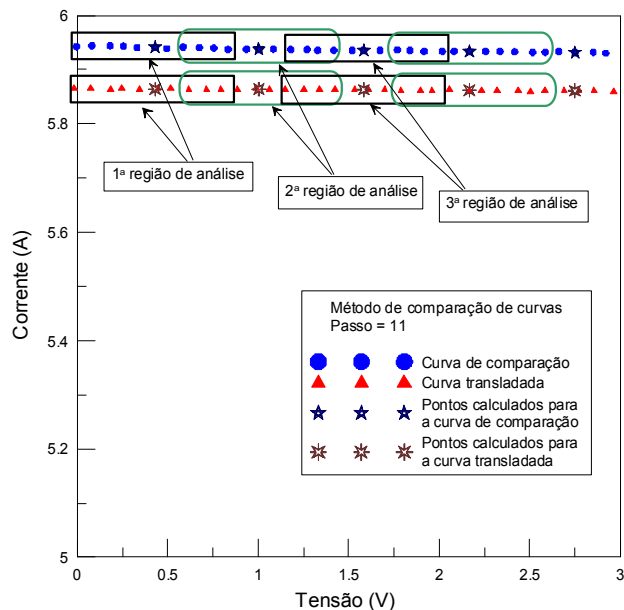


Figura 1 – Ampliação da região próxima à de curto-circuito de duas curvas de um módulo fotovoltaico em comparação. Observam-se três regiões de análise nas quais são aplicadas regressões lineares que geram pontos com um valor desejado de tensão.

- d) Para cada região de análise é aplicada uma regressão linear sendo então obtida uma equação de ajuste.
- e) A tensão correspondente ao termo central dos pontos pertencentes a cada passo na curva de referência é inserida na equação de ajuste e é então calculada uma corrente elétrica associada e ou uma potência
- f) As regressões são aplicadas para cada região de análise e este processo é realizado tantas vezes quanto à equação (2) definir, de forma que toda a curva seja varrida.

$$TGP = \frac{TUP}{(STP - BCK)} + 1,5 \quad (2)$$

onde  $TGP$  corresponde ao número total de pontos gerados por regressões lineares para a representação da curva de comparação e  $TUP$  corresponde ao número de pontos disponíveis na curva medida no primeiro quadrante.

Como a tensão que é inserida na equação de ajuste é igual ao termo central dos pontos escolhidos para cada região de análise, mesmo nas regiões de maior curvatura de uma curva  $I-V$ , uma regressão linear fornece um bom resultado. A figura 2 apresenta uma curva  $I-V$  com cerca de 300 pontos medidos entre  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  e os pontos gerados matematicamente utilizados para reproduzir essa curva. Para cada regressão linear realizada, retornando em um ponto calculado, foram usados 15 pontos medidos. Levando em conta o recuo que este método utiliza, que para 15 pontos por regressão linear é de 6 pontos, o exemplo apresentado na figura 2 possui um total de 35 pontos gerados matematicamente para reproduzir a curva  $I-V$ . A figura 2 apresenta algumas retas de ajuste para diferentes regiões da curva medida e uma região ampliada da curva  $I-V$  onde se verifica uma boa coerência entre a reta de ajuste e os pontos medidos.

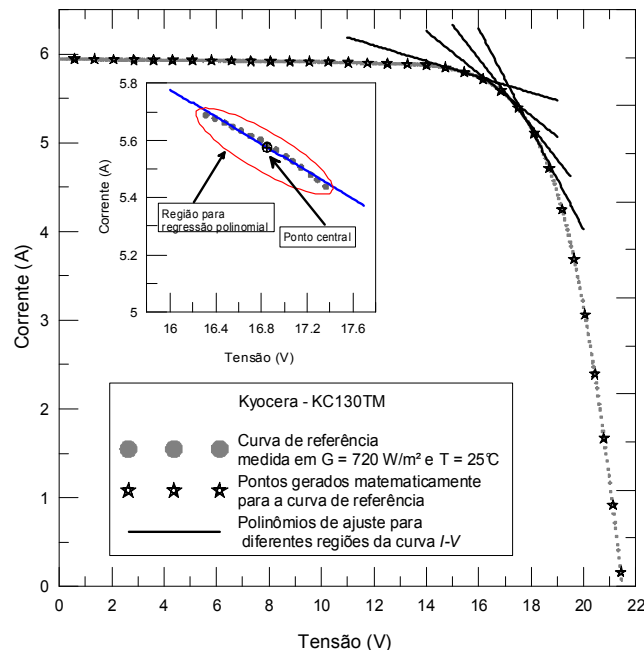


Figura 2: Curva medida a  $720 \text{ W/m}^2$  e  $25^\circ\text{C}$  para um módulo (m-Si), retas de ajustes para algumas regiões da curva  $I-V$  medida e pontos gerados por regressões lineares. Também é possível observar uma região ampliada da curva onde se verifica o ajuste linear para os pontos medidos.

Conforme pode-se observar na região de destaque da figura 2, uma reta apresenta um ajuste consideravelmente bom para a representação de uma região da curva  $I-V$ , desde que a curva seja dividida em pequenos intervalos de tensão.

Após diversos testes em módulos com formas de curva  $I-V$  das mais diversas chegou-se a conclusão de que um polinômio de ajuste de grau 2 ou superior só apresenta melhor resultado do que a utilização de regressões lineares se o passo escolhido compreender uma faixa de tensão superior a 2% da tensão de circuito aberto. Se o passo escolhido for pequeno, de forma que o intervalo de tensão mínimo seja inferior a 2% de  $V_{OC}$ , então a representação da curva por meio de regressões lineares é suficientemente eficaz.

#### Geração da curva de comparação

- a) São determinados os valores de tensão onde começam e terminam cada região de análise na curva de referência.
- b) Estes valores de tensão são utilizados para delimitar as regiões de análise na curva de comparação.
- c) Os pontos pertencentes a cada região de análise na curva de comparação são contados. Esta etapa precisa ser realizada, pois o número de pontos pertencentes a cada região de análise não será necessariamente o mesmo.
- d) Uma regressão linear é aplicada para cada região de análise.

- e) As mesmas tensões que foram inseridas nos polinômios da curva de referência são agora inseridas nos polinômios da curva de comparação. As correntes elétricas ou potências para cada valor de tensão são calculadas. A figura 3 apresenta uma curva medida na condição de translação e uma curva transladada para um módulo de silício monocristalino, bem como os pontos gerados a partir de regressões lineares para ambas as curvas.

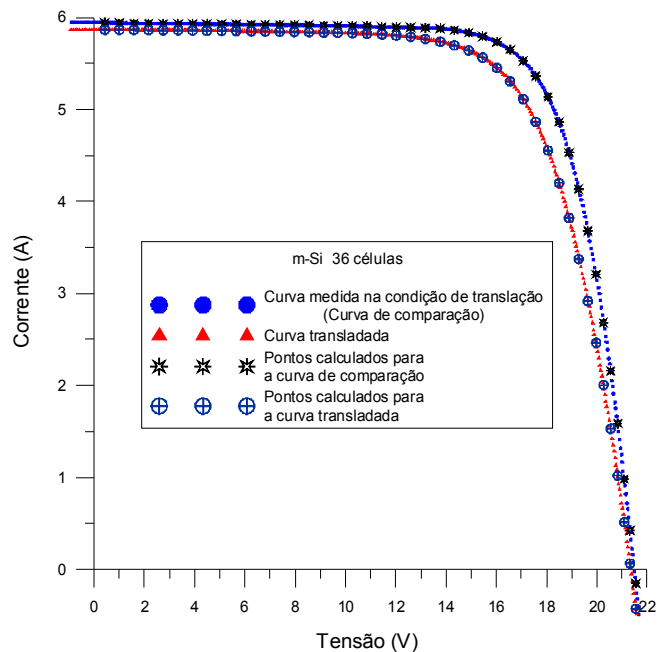


Figura 3 – Curva medida a  $890 \text{ W/m}^2$  e  $52^\circ\text{C}$  e transladada para a condição de  $720 \text{ W/m}^2$  e  $25^\circ\text{C}$ , curva medida na condição de translação e pontos gerados por regressões lineares.

Esta técnica de múltiplas regressões lineares, aplicada a pequenos intervalos de tensão, permite que a curva gerada matematicamente represente bem a original, mesmo se a forma da curva apresentar imperfeições que podem ser oriundas de células defeituosas ou de diferenças entre as células constituintes de um módulo. Este método de análise também pode ser muito útil no caso de curvas de *arrays*. A qualidade da curva de um *array* depende da semelhança das características elétricas dos módulos que o constituem. Como a diferença entre módulos de um *array*, mesmo módulos pré-selecionados, é freqüentemente maior do que as diferenças entre as células de um módulo, a curva de um *array* também é freqüentemente mais defeituosa.

Uma boa representação da curva em análise, de acordo com a metodologia proposta, depende evidentemente de dois aspectos que são o número de pontos por região de análise (passo) e o número total de pontos gerados matematicamente. Estes dois aspectos estão interligados, e ambos dependem do número de pontos que a curva  $I-V$  possui entre o curto-circuito e o circuito aberto. De forma simples pode-se dizer que quanto mais pontos cada região de análise dispôr para a regressão linear, e quanto mais pontos forem gerados matematicamente para representar a curva  $I-V$ , melhor será o resultado final deste método. Atualmente o sistema de aquisição de curvas  $I-V$  do Laboratório de Energia Solar da UFRGS possui um limite de medição de 2000 pontos por curva, entretanto curvas  $I-V$  medidas com 500 pontos, dos quais ao menos 200 estejam no primeiro quadrante, já proporcionam boas condições de pós-processamento.

Como forma de visualizar a precisão envolvida na metodologia de análise proposta, foi gerada matematicamente, utilizando o *software* CREARRAY, uma curva  $I-V$  de um *array* de  $6 \times 2$  módulos de 30 células e 65 W de potência nominal. Esta curva foi gerada simulando uma situação de sombreamento parcial em dois dos módulos do *array*, originando dessa forma dois degraus de corrente. Através desta curva defeituosa fica fácil evidenciar a eficácia do método proposto para análise de curvas  $I-V$ . A figura 4 apresenta esta curva  $I-V$  defeituosa, bem como os pontos gerados matematicamente pelo método proposto através de regressões por polinômios de ordem 1, utilizando 7 pontos por regressão. A figura 5 apresenta ainda, para fins de comparação, ajustes para a curva  $I-V$  a partir de um único polinômio de ordem 6 e ordem 8.

Como pode ser observado na figura 5, a técnica de dividir a curva em regiões de análise para gerar pontos com valores desejados de tensão proporciona resultados melhores do que a aplicação de um único polinômio. Para representar matematicamente uma curva  $I-V$  a partir de um único polinômio este precisa ter um grau elevado, tipicamente superior a 6. Entretanto para a representação de curvas com imperfeições o grau do polinômio precisa ser maior, muitas vezes superior a 10. Na curva da figura 4, pode-se observar que um polinômio de grau 6 fornece um ajuste pobre, e mesmo o polinômio de grau 8 fornece um ajuste consideravelmente inferior ao do método proposto.

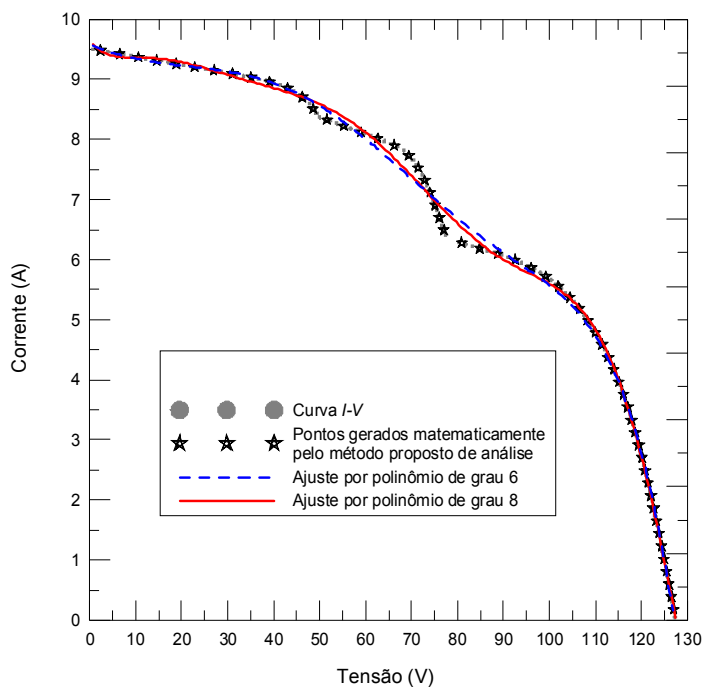


Figura 4 – Curva  $I-V$  teórica de um array parcialmente sombreado, pontos gerados matematicamente pela metodologia descrita e ajustes por polinômios de sexto e oitavo graus.

#### COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS

Uma vez que os pontos para a representação das curvas de referência e de comparação já tenham sido gerados, com valores de tensões iguais, torna-se possível a comparação entre essas curvas seja por meio da corrente ou da potência. Uma vez que o produto de maior interesse de qualquer dispositivo fotovoltaico é a potência que este é capaz de fornecer, o método de comparação entre duas curvas  $I-V$  será aqui apresentado em termos de potência. A figura 5a apresenta duas curvas  $I-V$ , a serem comparadas, de um módulo de silício amorfo medidas sob condição de sombreamento parcial. A figura 5b apresenta as curvas de potência e a diferença entre as potências dessas curvas.

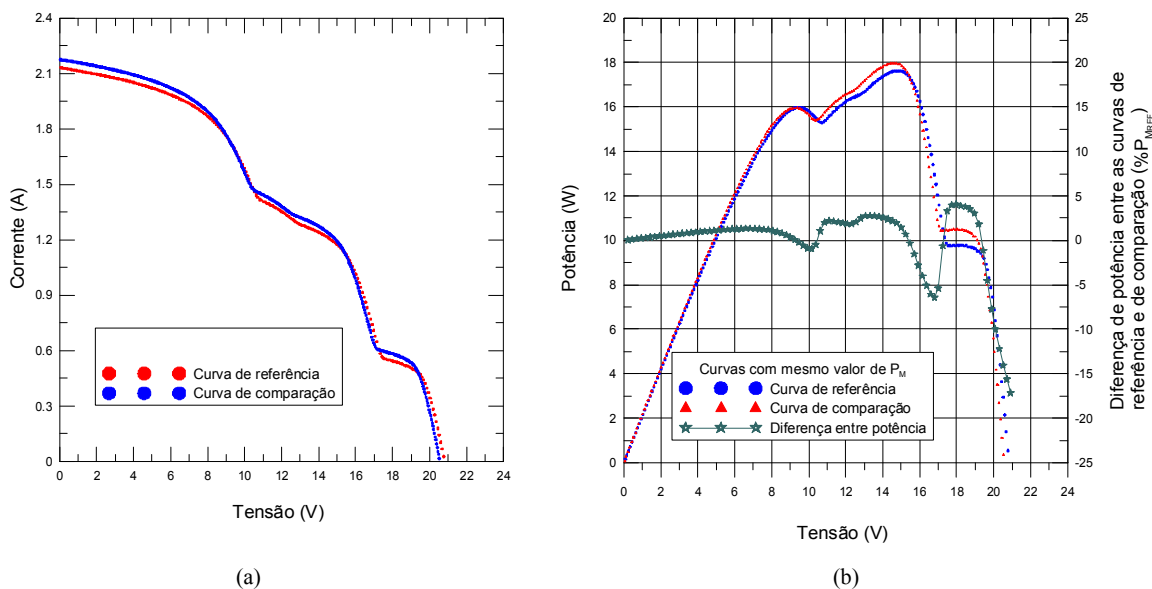


Figura 5 – (a) Curvas  $I-V$  a serem comparadas de um módulo de silício amorfo medidas sob condição de sombreamento parcial. (b) Curvas de potência e diferença entre as potências dessas curvas apresentadas em termos percentuais da máxima potência da curva de referência.

Como forma de obter um resultado da diferença global entre duas curvas, avaliada ao longo de todo o primeiro quadrante, um desvio médio ou médio quadrático entre as potências da curva de referência e de comparação pode ser calculado. O desvio médio quadrático, aqui apresentado em termos de porcentagem da máxima potência da curva de referência, é definido pela equação (3). A partir do cálculo do desvio médio quadrático fica possível avaliar quantitativamente a diferença entre uma curva de referência e uma outra qualquer, e dessa forma, por exemplo, avaliar dentre diferentes métodos de translação de curvas características qual método é mais adequado.

$$DMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{100}{P_{MREF}} \right) (P_{REFi} - P_{TRi}) \right]^2}{N}} \quad (3)$$

onde  $DMQ$  é o desvio médio quadrático,  $N$  corresponde ao número de amostras,  $P_{REFi}$  é a  $i$ -ésima potência na curva de comparação,  $P_{TRi}$  é a  $i$ -ésima potência na curva transladada e  $P_{MREF}$  é a máxima potência na curva de referência.

### APLICAÇÃO DO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÓDULOS DE MESMO MODELO

Como exemplo de aplicação do método de comparação de curvas proposto neste trabalho, curvas  $I-V$  de oito módulos diferentes da marca Isofotón, modelo I-100/24 foram medidas. Os módulos foram expostos a uma irradiância próxima de  $1000 \text{ W/m}^2$  e assim que suas temperaturas atingiram o equilíbrio térmico com o meio suas curvas foram medidas com um sistema de aquisição possibilitando cerca de 500 pontos por curva. Posteriormente todas as curvas foram transladadas, segundo o método proposto pela norma IEC, para uma temperatura média de  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  e uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Ensaios prévios já haviam sido efetuados para este modelo de módulo fotovoltaico para determinar o valor de resistência série e fator de correção, necessários para a aplicação do método de translação IEC. As potências das oito curvas foram então comparadas com a potência de uma curva de referência gerada pelo software CREARRAY para este modelo de módulo fotovoltaico. As curvas dos oito módulos ensaiados são apresentadas nas figuras 7 e 8, bem como a diferença de potência destes módulos em relação à curva de referência. Nas figuras 7 e 8 também é apresentada a curva de referência.

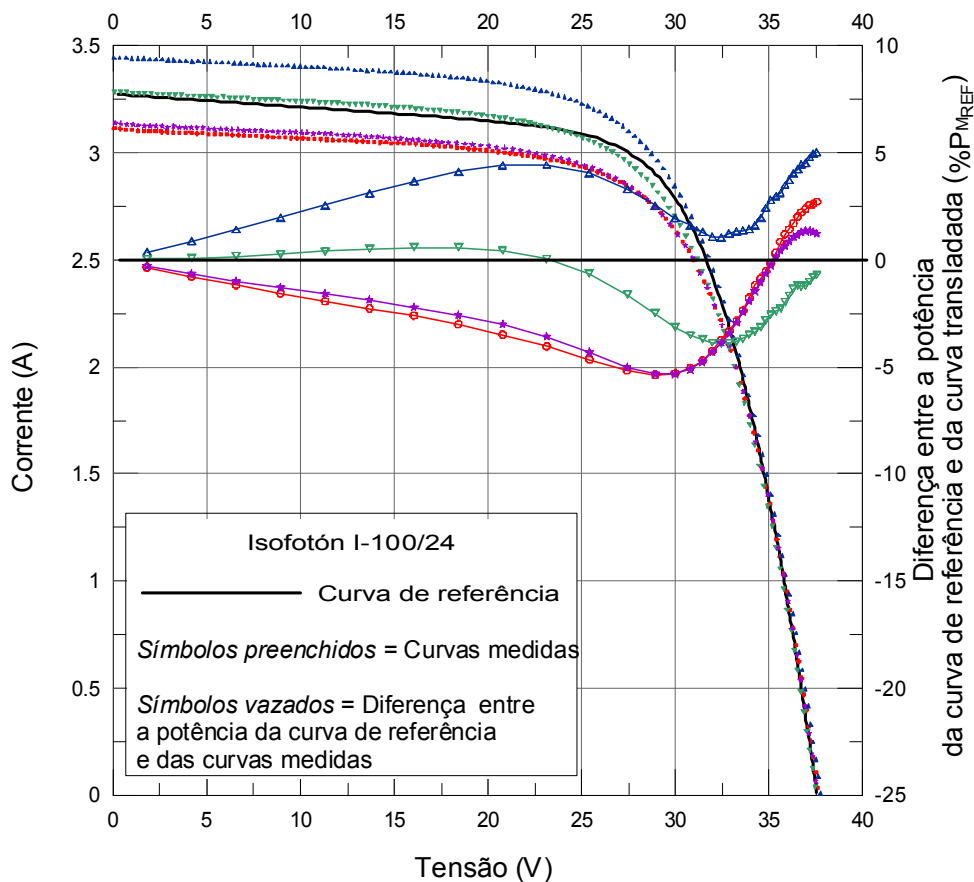


Figura 7 – Curvas de quatro dos oito módulos ensaiados da marca Isofotón, modelo I-100/24, curva de referência gerada matematicamente a partir de dados de catálogo e diferença de potência entre as curvas medidas e a curva de referência.

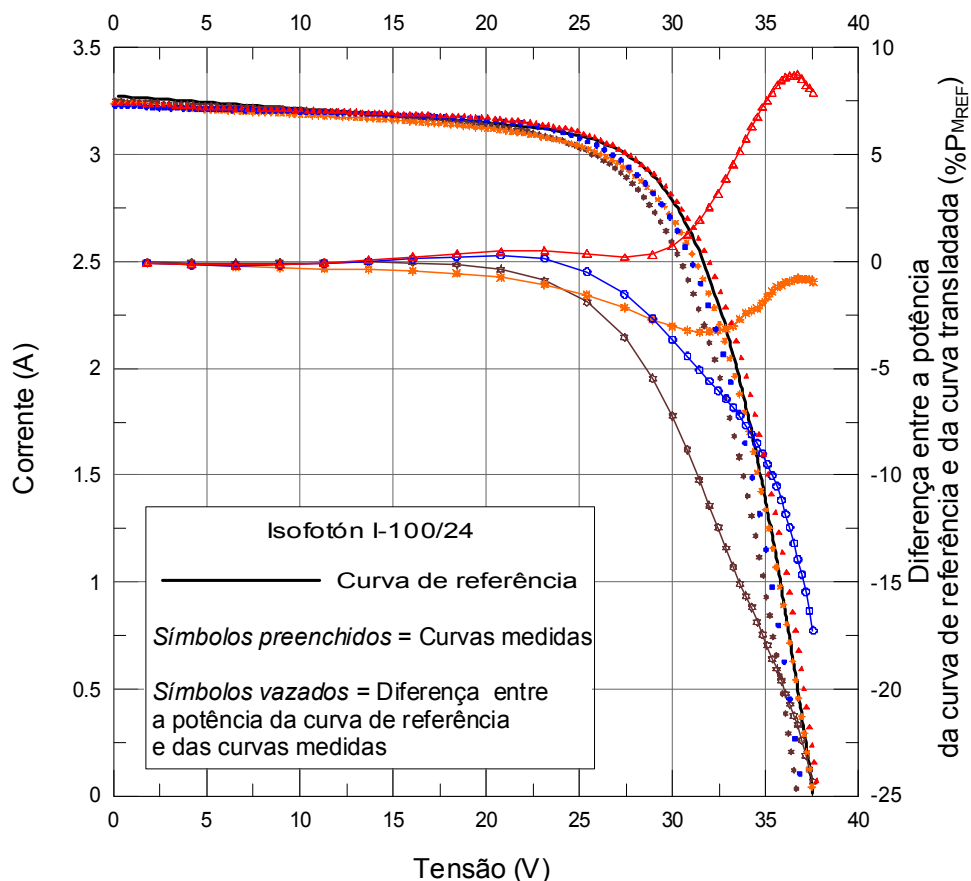


Figura 8 – Curvas dos outros quatro módulos ensaiados, curva de referência e diferença de potência entre as curvas medidas e a curva de referência.

Como pode ser observado pelas figuras 7 e 8, dos oito módulos medidos, quatro apresentaram regiões na curva de potência com valores inferiores a 5% em relação à curva de referência. Dois destes módulos apresentaram regiões com mais de 15% de potência a menos do que a encontrada na curva de referência. Por outro lado, dois módulos apresentaram regiões em suas curvas com potências até 5% superior a da curva de referência. Para uma análise ao longo de toda a curva  $I-V$ , a tabela 1 apresenta os desvios médios, desvios médios quadráticos e diferença na máxima potência para os oito módulos ensaiados.

Módulo	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Desvio médio ( $\%P_{MREF}$ )	-1,42	2,80	-1,69	1,61	-11,48	-1,54	-6,48	4,08
Desvio médio quadrático ( $\%P_{MREF}$ )	2,92	3,10	2,30	2,71	14,38	1,86	8,48	5,43
Diferença na máxima potência ( $\%P_{MREF}$ )	-5,35	2,59	-2,45	-5,32	-4,98	-2,69	-2,58	0,48

Tabela 1: Desvio médio, desvio médio quadrático e diferença na máxima potência de oito módulos medidos em relação a uma curva de referência.

Analisando a tabela 1 é possível observar que dos oito módulos ensaiados, seis apresentaram uma potência inferior quando comparada com a curva de referência. Destes seis módulos dois apresentaram uma potência mais do que 5% inferior àquela esperada de acordo com a curva de referência.

## CONCLUSÕES

Foi apresentado um método de comparação quantitativa de curvas características de dispositivos fotovoltaicos que permite uma análise ao longo de todo o primeiro quadrante, fornecendo um resultado mais completo do que uma comparação apenas no ponto de máxima potência. O método mostrou-se bastante confiável quanto à reprodução matemática de curvas medidas, mesmo em curvas bastante defeituosas, como acontece em dispositivos fotovoltaicos medidos em condição de sombreamento parcial.

Foi apresentado um exemplo de aplicação do método de comparação de curvas proposto por este trabalho, onde curvas de oito módulos de silício monocristalino foram medidas e posteriormente comparadas com uma curva de referência gerada a partir dos dados informados pelo fabricante. Por meio do método de comparação de curvas proposto, foi possível calcular um desvio médio e médio quadrático da potência de cada módulo em relação a potência de uma curva de referência. Foi observado que dos oito módulos ensaiados, seis apresentaram um desvio médio negativo, indicando um valor de potência médio ao longo de suas curvas inferior ao da curva de referência. Analisando apenas a diferença na máxima potência, seis módulos apresentaram um valor inferior ao da curva de referência e destes seis módulos, dois deles apresentaram um valor superior a 5% menos do que o esperado em relação a referência.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- ASTM, American Society for Testing and Materials (2002), ASTM E 1036-02. Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.
- Bühler, A. J. e Krenzinger, A., (2008). Comparação entre diferentes métodos de translação de curvas  $I-V$  de módulos fotovoltaicos, In: Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferencia Latinoamericana de la ISES, 2008, Florianópolis. Anais do II CBENS & III ISES-CLA. Recife : ABENS.
- Krenzinger, A. e Adams, T. R., (1999). Crearray – Software para calcular curvas características de arranjos de módulos fotovoltaicos, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, disponível em [www.solar.ufrgs.br](http://www.solar.ufrgs.br).
- Jacobson, A., Kammen, D., Duke, R. and Hankins, M., (2000). Field performance measurements of amorphous silicon photovoltaic modules in Kenya, Conference Proceedings of the American Solar Energy Society (ASES) Madison, Wisconsin, USA, pp. 16-21.
- Gasparin, F. P., (2009). Desenvolvimento de um traçador de curvas características de Módulos Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- IEC, (1987). International Electrotechnical Commission – IEC-891. Procedures irradiance correction to measured  $I-V$  characteristics of crystalline silicon devices for temperature and irradiance.
- Krenzinger, A., (2001). An Algorithm for PV Array Analysis, In: 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich. Proceedings of the 17<sup>th</sup> EPVSEC. Florença, Itália: Mani Fotolito, pp. 816-819.
- Krenzinger, A. e Prieb, C. W. M., (2005). Clasificación y Selección de Módulos Fotovoltaicos para una Central Conectada a la Red, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Salta, Argentina, v. 9, n. 04, pp. 19-23.
- Tsuno, Y., Hishikawa, Y. e Kurokawa, K., (2006). Translation Equations for Temperature and Irradiance of the  $I-V$  Curves of Various PV Cells and Modules, Proceedings of the 4<sup>th</sup> WCPEC, Waikoloa, Hawaii, pp. 2246-2249.

## ABSTRACT

A qualitative comparison between two or more characteristic curves of photovoltaic devices can be visually performed just overlapping the curves. On the other hand, for a quantitative analysis of the differences between two measured curves it is necessary that equal measured voltage values exist in both curves. Thus the associate current or power of the curves can be compared. Obtaining experimentally, the same values of voltage for two different curves, taking into account the accuracy involved in the measurements, is something very difficult to happen. This work presents a comparison method for  $I-V$  curves of photovoltaic cells, modules or arrays. This method consists in generating mathematically two curves to be compared, with high fidelity, by means of multiple linear regressions, providing this way the possibility for accomplishing a quantitative analysis.

**Keywords:** Photovoltaic module,  $I-V$  characteristic curve, characterization methods.