

ANÁLISE DA TRANSLAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FOTVOLTAICOS SEGUNDO AS NORMAS TÉCNICAS

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

RESUMO: Quando uma curva $I-V$ de um dispositivo fotovoltaico é obtida fora da condição padrão, ou quando se deseja conhecer seu comportamento em uma condição diferente da medida, se faz necessária a aplicação de algum método de correção ou translação. Tanto a norma brasileira NBR-12302, quanto a norma internacional IEC-891 estabelecem um método de translação de curvas $I-V$, dependente de alguns parâmetros que precisam ser determinados experimentalmente. Entre estes parâmetros estão a resistência série do módulo e o fator de correção da curva. Embora a norma estabeleça os procedimentos de determinação destes parâmetros ela não é clara em relação à resistência série e, além disso, consiste em um método bastante trabalhoso, uma vez que exige a determinação de três curvas com mesma temperatura e diferentes irradiancias. Este trabalho apresenta um estudo dos resultados da aplicação da norma NBR-12302 em módulos de diferentes tecnologias, bem como propõe uma metodologia alternativa em substituição à existente na determinação da resistência série.

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

INTRODUÇÃO

De forma a padronizar os ensaios de caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos, estes tem de ser feitos sob uma condição específica de temperatura, irradiancia e espectro da radiação incidente, denominada condição padrão ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $AM = 1,5$ e $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). Quando a curva $I-V$ é obtida fora da condição padrão, ou quando se deseja conhecer seu comportamento em uma condição diferente da medida, se faz necessária a aplicação de algum método de translação. É possível encontrar na literatura diversos métodos de translação de curvas $I-V$. Alguns propõem a translação ponto a ponto dos valores medidos, tais quais Alonso, (2002) e Anderson, (1995) enquanto outros métodos propõem a translação por meio analítico considerando o comportamento interno dos geradores fotovoltaicos como, por exemplo, Van Overstraeten *et. al.* (1986).

As normas técnicas também apresentam seus procedimentos e equações de translação. A norma americana ASTM E 1035-96 (1996) estabelece um método de translação onde tanto a corrente quanto a tensão são transladadas por proporcionalidade. Este procedimento, no entanto, implica com que o fator de forma não seja alterado na translação, resultando em uma deformação na curva transladada e conseqüente erro na predição da potência fornecida pelo dispositivo fotovoltaico. Como forma de minimizar os erros inerentes a este método Marion, *et. al.*, (1999) sugerem a obtenção de uma matriz de curvas com diferentes valores de irradiancia e temperatura limitando assim a faixa de translação. Dessa forma trata-se de um método bastante trabalhoso, uma vez que exige muitos ensaios para que o dispositivo fotovoltaico possa ser qualificado.

A norma internacional IEC-891, (1987) e a norma brasileira NBR-12302 (ABNT, 1991a), estabelecem um método de translação para curvas $I-V$ de dispositivos fotovoltaicos. Os procedimentos destas normas em relação à translação podem ser considerados praticamente idênticos. Para a aplicação deste método é necessária a determinação de dois parâmetros, o fator de correção da curva (K) e a resistência série (R_s) do módulo, cujo procedimento de determinação é descrito na NBR-12136 (ABNT, 1991b). Para o fator K , responsável pelo ajuste da curva devida a não uniforme variação de cada valor de tensão com a temperatura, a norma estabelece a determinação de três curvas com mesma irradiancia e diferentes temperaturas e para a determinação de R_s três curvas com mesma temperatura, mas diferentes irradiancias. Entretanto, para o método de obtenção de R_s é necessária a escolha de um valor de tensão “ligeiramente” superior à de máxima potência da curva de maior irradiancia. A norma, porém, não estabelece qual deve ser a relação entre essa tensão escolhida e a de máxima potência.

Este trabalho apresenta um estudo sobre os resultados da aplicação da norma NBR-12302 para módulos de diferentes tecnologias, bem como propõe uma metodologia nova em substituição à existente na determinação da resistência série. Os valores de R_s obtidos por esta metodologia são testados nas equações da norma e utilizados para transladar curvas medidas para outra condição de temperatura e irradiancia onde outras curvas também foram medidas, de forma a verificar a precisão da translação.

ATRANSLAÇÃO DE UMA CURVA $I-V$ SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA ABNT-12302

De acordo com a norma brasileira, a equação (1) representa a correção da corrente e a equação (2) representa a correção da tensão para uma translação de diferentes condições de irradiancia e temperatura.

$$I_2 = I_1 + I_{sc1} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha(T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) - \beta(T_2 - T_1) \quad (2)$$

onde, V_1 , I_1 e I_{sc1} são respectivamente a tensão, a corrente e a corrente de curto-circuito medidas na condição de temperatura T_1 e irradiância G_1 , V_2 e I_2 correspondem a tensão e a corrente corrigidas para a temperatura T_2 e irradiância G_2 .

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DA CURVA (K)

Quando uma translação entre duas condições de diferentes temperaturas é realizada, a variação que cada valor de tensão medido sofre não é exatamente a mesma. Para corrigir este efeito a norma internacional incrementou na sua equação de translação um fator de correção. Posteriormente a norma brasileira adotou a mesma metodologia.

Este fator de correção varia dependendo da tecnologia do dispositivo fotovoltaico e das propriedades de sua curva $I-V$. De forma a visualizar a influência do fator de correção na translação de uma curva característica, foram geradas duas curvas analíticas para uma temperatura de 10 °C e de 70 °C, correspondentes a uma irradiância de 1000 W/m². A curva correspondente a temperatura de 10 °C foi então transladada para a condição de 70 °C utilizando dois fatores de correção diferentes. A figura 1 apresenta duas curvas relativas a 1000 W/m² e 10 °C e 1000 W/m² e 70 °C, bem como a translação de uma condição para outra utilizando um fator de correção igual a $1 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ e igual a $4,8 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$, para o módulo.

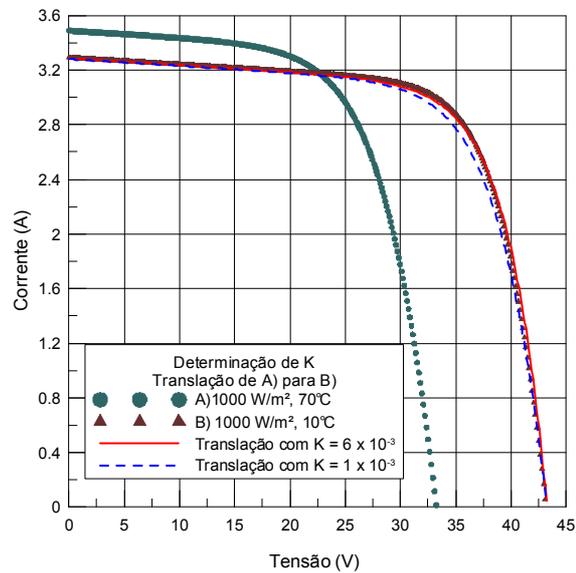


Figura 1: Influência do fator de correção na translação de uma curva característica para uma diferente condição de temperatura, mas mesma irradiância.

Uma vez conhecidos os coeficientes de variação com a temperatura da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito é possível a determinação do fator de correção da curva, segundo a norma NBR-12302, como é descrito a seguir: Determinam-se três curvas $I-V$ do dispositivo em ensaio com diferentes temperaturas, mas mesma irradiância, porém com valor não superior ou inferior a 30% da irradiância para a qual se pretende transladar a curva posteriormente. Translada-se a curva medida na condição de temperatura T_3 para a condição medida de temperatura T_4 segundo as equações (3) e (4). Para a translação são utilizados diferentes valores de K , até que se atinja a precisão desejada. O mesmo procedimento é realizado transladando a curva medida na condição de temperatura T_3 para T_5 e T_4 para T_5 . O valor de K para o dispositivo em ensaio resulta da média aritmética dos valores individuais obtidos para cada translação.

$$I_4 = I_3 + \alpha(T_4 - T_3) \quad (3)$$

$$V_4 = V_3 - KI_4(T_4 - T_3) - N_s\beta(T_4 - T_3) \quad (4)$$

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE (R_s)

A determinação da resistência série interna ao módulo, segundo a norma NBR-12136 (ABNT, 1991b) é sucintamente descrita a seguir:

Determinam-se três curvas $I-V$, cada uma com um valor diferente de irradiância, mas com a mesma temperatura dentro de uma tolerância de ± 1 °C. É escolhido um ponto $P_1 (V_1, I_1)$ na curva referente ao maior valor de irradiância correspondente a

um valor de tensão ligeiramente maior do que a tensão do ponto de máxima potência. Determina-se então a diferença entre a corrente de curto-circuito e a corrente relativa ao ponto P_1 . Esta diferença de corrente é então subtraída da corrente de curto-circuito da curva de irradiância intermediária resultando no ponto $P_2(V_2, I_2)$. Um valor de resistência série é obtido a partir da equação (5).

$$R_{S1} = \frac{V_{P2} - V_{P1}}{I_{P1} - I_{P2}} \quad (5)$$

O mesmo procedimento é realizado entre as curvas de maior e menor irradiância e entre as curvas de menor e intermediária irradiância, resultando em outros dois valores de resistência série. O valor de R_S do módulo é obtido a partir da média aritmética das três resistências calculadas.

Para melhor compreensão do método proposto pela norma brasileira apresenta-se a figura 2.

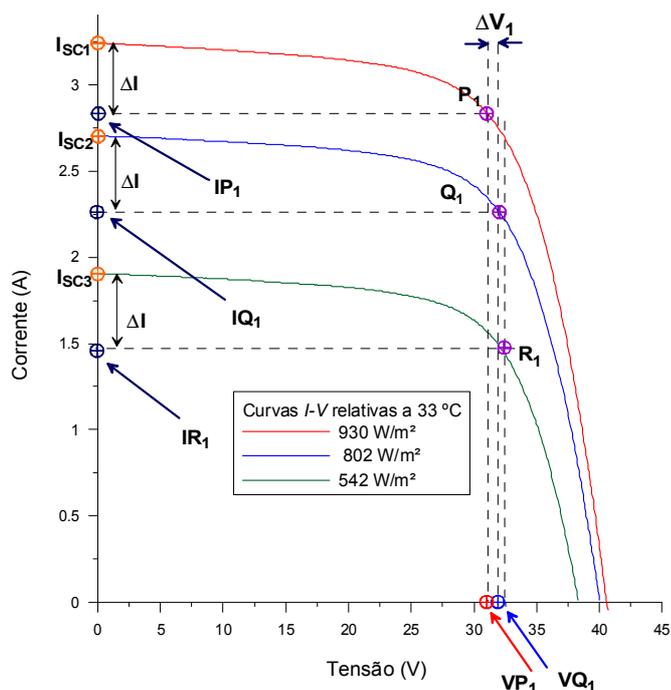


Figura 2: Representação do método proposto para a determinação de R_S pela norma NBR-12136.

METODOLOGIA PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DA NORMA NBR-12302

Para a determinação do fator de correção da curva foi adotada a seguinte metodologia:

- Com o módulo exposto à luz do Sol, determina-se uma curva característica a cada aumento de temperatura de 3 °C, até que a temperatura do módulo atinja o máximo valor. É importante que a irradiação varie o mínimo possível entre os ensaios das curvas. Neste trabalho foi tolerada uma máxima variação de 10 W/m².
- A partir do conjunto de curvas medidas determinam-se os coeficientes α e β do módulo em ensaio.
- São então escolhidas três curvas, relativas a menor, maior e intermediária temperatura.
- Através das equações de translação estabelecidas pela norma NBR-12302 a curva relativa à menor temperatura é transladada para a condição de temperatura intermediária utilizando um fator de correção igual a $2 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$.
- As máximas potências da curva transladada e da curva medida na temperatura de translação são determinadas com alto grau de precisão através de regressão polinomial de ordem 2 junto aos joelhos de cada curva.
- Caso a diferença entre as máximas potências da curva transladada e medida for superior a 0,5% duas novas translações são realizadas, uma com um valor de $K + 0,5 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ e outra com $K - 0,5 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$.
- Se a soma de $0,5 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ no fator de correção do módulo fizer a diferença entre as potências diminuir, então este valor é acrescido sucessivamente até que a diferença entre as potências se torne inferior a 0,5%. Em caso contrário, o valor de $0,5 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ é subtraído sucessivamente.
- Os passos de d) a g) são repetidos para a translação da curva relativa à menor temperatura para a maior temperatura e posteriormente da temperatura intermediária para a maior.
- O fator de correção final é então obtido através da média dos três valores de K pré-determinados.

Para a determinação da resistência série, segundo a norma NBR-12136, foi adotada a seguinte metodologia:

- Uma das curvas utilizadas para a determinação dos coeficientes térmicos e do fator de correção é escolhida como a curva de maior irradiância no conjunto das três curvas necessárias para a determinação de R_S .
- Posiciona-se o módulo com um ângulo de $\pm 15^\circ$ entre a superfície do módulo e o feixe central de raios de luz.
- A temperatura do módulo é controlada (utilizando irradiância solar para o aquecimento ou uma cobertura opaca para o resfriando) até que assuma o mesmo valor da curva de maior irradiância com uma precisão de $0,5^\circ\text{C}$.
- Determina-se a curva com irradiância intermediária.
- Posiciona-se o módulo com um ângulo de aproximadamente 30° entre a superfície do mesmo e o feixe central de raios de luz. Quando a temperatura do módulo atinge o valor no qual as outras duas curvas foram determinadas, é medida a curva de menor irradiância.
- São selecionados 10 pontos com tensão maior e 10 pontos com tensão menor do que a de máxima potência de cada uma das 3 curvas obtidas para a determinação de R_S . Através destes pontos é obtida uma equação de ajuste por meio de regressão polinomial de ordem 2. Dessa forma, a máxima potência de cada curva é determinada com grande precisão.
- Um valor de tensão 1% maior do que a de máxima potência da curva de maior irradiância é inserido na equação (6). A escolha deste valor será explicada posteriormente. Calcula-se então a corrente associada à tensão mencionada;

$$I_{P1} = a_1 V_{P1} + b_1 + \frac{c_1}{V_{P1}} \quad (6)$$

Na equação (6), V_{P1} é a tensão 1% superior a tensão de máxima potência na curva de maior irradiância, I_{P1} é a corrente correspondente à V_{P1} e a_1 , b_1 e c_1 são os coeficientes da regressão polinomial de ordem 2 aplicada junto a região de máxima potência na curva de maior irradiância. Um intervalo de corrente ΔI é então obtido subtraindo a corrente de curto-circuito da curva de maior irradiância de I_{P1} .

- Fazendo a diferença entre a corrente de curto-circuito da curva de irradiância intermediária e ΔI obtém-se I_{P2} . O valor de tensão associado a esta corrente (V_{P2}) é então determinado com grande precisão da seguinte forma:

Um valor de tensão (V_{P2_TRY}) igual à tensão de máxima potência da curva de irradiância intermediária é utilizado como valor inicial na equação (7) resultando em um valor de corrente (I_{P2_TRY}). Este valor de corrente é então comparado com I_{P2} . Se a diferença entre I_{P2_TRY} e I_{P2} for superior a 0,1% então um novo valor de V_{P2_TRY} , igual a $V_{P2_TRY} + 0,001\text{ V}$ é inserido na equação (7), e assim sucessivamente. O valor de V_{P2_TRY} que fizer I_{P2_TRY} ficar igual a I_{P2} , dentro da precisão desejada é tomado como V_{P2} .

$$I_{P2_TRY} = a_2 V_{P2_TRY} + b_2 + \frac{c_2}{V_{P2_TRY}} \quad (7)$$

Na equação (7), a_2 , b_2 e c_2 são os coeficientes da regressão polinomial de ordem 2 aplicada junto a região de máxima potência na curva de irradiância intermediária.

- O passo h) é repetido para a curva de menor irradiância, obtendo assim a corrente I_{P3} e a tensão V_{P3} .
- Os passos g) e h) são repetidos utilizando as curvas de irradiância intermediária e de menor irradiância resultando assim nas correntes I_{P4} e I_{P5} e tensões V_{P4} e V_{P5} .
- Por fim, são calculados 3 valores de R_S e a média destes fornece o valor da resistência série do dispositivo em ensaio, tal como é apresentado na equação (8).

$$R_{S_NORMA} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_{P2} - V_{P1}}{I_{P1} - I_{P2}} + \frac{V_{P3} - V_{P1}}{I_{P1} - I_{P3}} + \frac{V_{P5} - V_{P4}}{I_{P4} - I_{P5}} \right) = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}{3} \quad (8)$$

Como pode ser visto o procedimento proposto para a determinação de R_S não difere essencialmente da norma, mas estabelece um critério bem definido para a escolha do valor de tensão acima da máxima potência da curva de maior irradiância, que será posteriormente explicado.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foram ensaiados 6 módulos de diferentes configurações e tecnologias. A tabela 1 apresenta detalhes dos módulos ensaiados

Fabricante	Modelo	Tecnologia	V_{OC} (catálogo)	I_{SC} (catálogo)	P_M (catálogo)	N_S
Kyocera	KC50T	Multicristalino	21,7	3,31	54	36
Kyocera	KC130TM	Multicristalino	21,9	8,02	130	36
Himin	HG50S	Monocristalino	21,6	3,13	50	36
Himin	HG135P	Multicristalino	21,6	8,68	135	36
Unisolar	US32	Amorfo	23,8	2,4	32	11
Isofotón	I-100/24	monocristalino	43,2	3,27	100	72

Tabela 1 – Dados relativos aos módulos ensaiados.

Os ensaios para a determinação de curvas $I-V$ foram feitos sob iluminação natural em dias de céu limpo e velocidade de vento desprezível. As medidas de temperatura dos módulos, em cada ensaio, são realizadas duas vezes, uma antes e outra depois da aquisição da curva, com uma variação máxima aceitável de $\pm 0,1$ °C. Para a medida da temperatura é utilizado um sensor tipo PT 100 classe A, fixado na parte de trás do módulo, em uma célula central. A precisão de medida é de $10 \mu\text{V}$ (resolução de 4 ½ dígitos) para a tensão. Todas as medidas de corrente, tensão e irradiância são feitas simultaneamente sendo que para cada ensaio são obtidos 512 pontos em um tempo total inferior a 1,5 segundos. Os coeficientes α e β de todos os módulos foram determinados a partir de um conjunto de curvas medidas à mesma irradiância, mas diferentes temperaturas segundo o procedimento já descrito. As figuras 3a e 3b apresentam respectivamente a variação da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito com a temperatura para um dos módulos ensaiados.

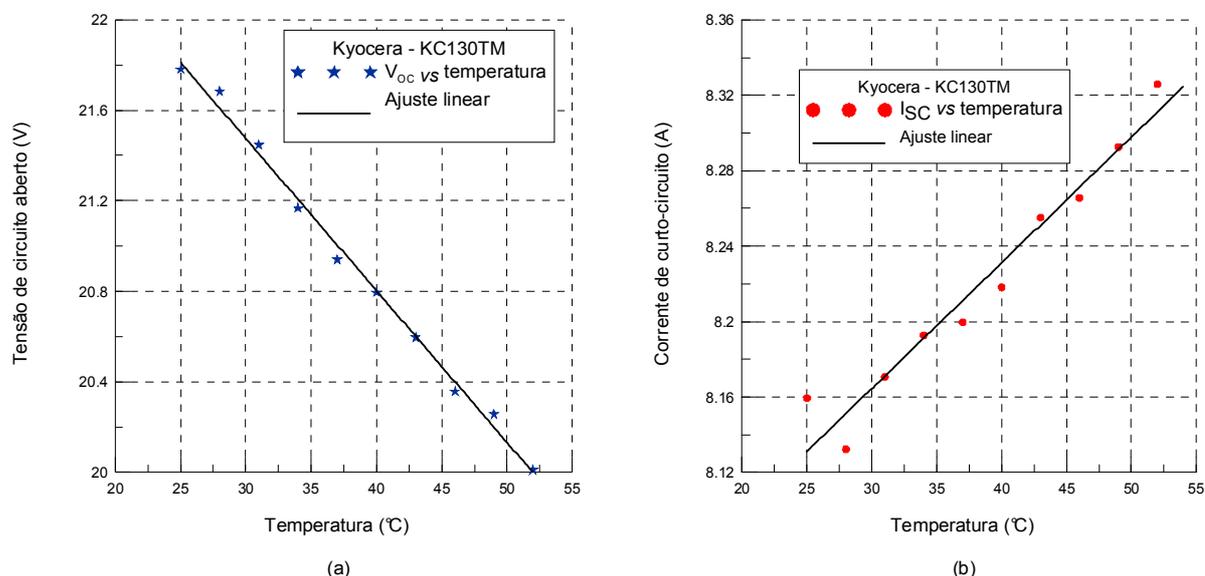


Figura 3: Ensaio da variação com a temperatura da (a) tensão de circuito aberto e (b) corrente de curto-circuito para o módulo da marca Kyocera, modelo KC130TM.

Após a determinação dos coeficientes térmicos e das curvas relativas à mesma temperatura, mas diferentes irradiâncias foi aplicada a metodologia proposta por este trabalho para a obtenção do fator de correção da curva. A tabela 2 apresenta os valores obtidos para os módulos ensaiados.

Módulo	K ($\Omega/^\circ\text{C}$)	α ($\%I_{SC}/^\circ\text{C}$)	β ($\text{mV}/^\circ\text{C}/\text{cél}$)	Incerteza em β ($\text{mV}/^\circ\text{C}/\text{cél}$)	Incerteza em α ($\%I_{SC}/^\circ\text{C}$)
KC50T	$0,33 \times 10^{-3}$	0,05	2,10	0,22	0,03
KC130TM	$0,66 \times 10^{-3}$	0,08	1,86	0,22	0,03
HG50S	$-0,50 \times 10^{-3}$	0,11	1,87	0,22	0,03
HG135P	$-1,17 \times 10^{-3}$	0,04	2,03	0,22	0,03
US32	$-16,50 \times 10^{-3}$	0,09	7,72	0,80	0,03
I-100/24	$5,50 \times 10^{-3}$	0,02	2,08	0,22	0,03

Tabela 2 – Coeficientes térmicos (α e β) dos módulos ensaiados obtidos experimentalmente a partir de ensaios com irradiância natural e fator de correção e resistência série determinadas segundo a norma NBR 12302.

No caso da determinação de R_S , tanto a norma NBR–12136, quanto à norma IEC-891 não estabelecem um critério definido quanto ao valor de tensão que deve ser escolhido (V_{PI}). Ambas as normas apenas estabelecem uma tensão “ligeiramente” maior do que a de máxima potência. Com a finalidade de verificar qual valor de tensão seria mais adequado para a determinação de R_S foi realizado o seguinte procedimento:

Para um dos módulos ensaiados foram escolhidos 5 diferentes valores de tensão, variando de uma tensão de 1% a 5% superior à de máxima potência. Este procedimento teve como objetivo avaliar a influência da escolha da tensão no resultado obtido para resistência série. Verificou-se uma dependência apreciável no valor obtido de R_S em função da porcentagem de tensão superior à de máxima potência escolhida, como pode ser visto na figura 4. Posteriormente, para o mesmo módulo, foram realizadas 5 translações entre duas condições para as quais foram medidas curvas. Cada uma das translações utilizou um valor de R_S diferente. Em cada uma das translações foi calculada a diferença entre a máxima potência da curva transladada e a potência da curva medida na segunda translação. A figura 5 apresenta a diferença entre as máximas potências da curva transladada e da medida na condição de translação em função da porcentagem de tensão escolhida acima da tensão de máxima potência, utilizada no cálculo de R_S .

Analisando a figura 4 observa-se que para o módulo ensaiado, na condição de translação aplicada não se obtém uma diferença de potência elevada entre a transladada e a medida na condição de translação. Por outro lado fica claro que quanto

menor a porcentagem de tensão superior à de máxima potência escolhida, melhor o resultado na translação. Por esta razão este trabalho adotou como 1% o fator de tensão utilizada para a terminação de R_S .

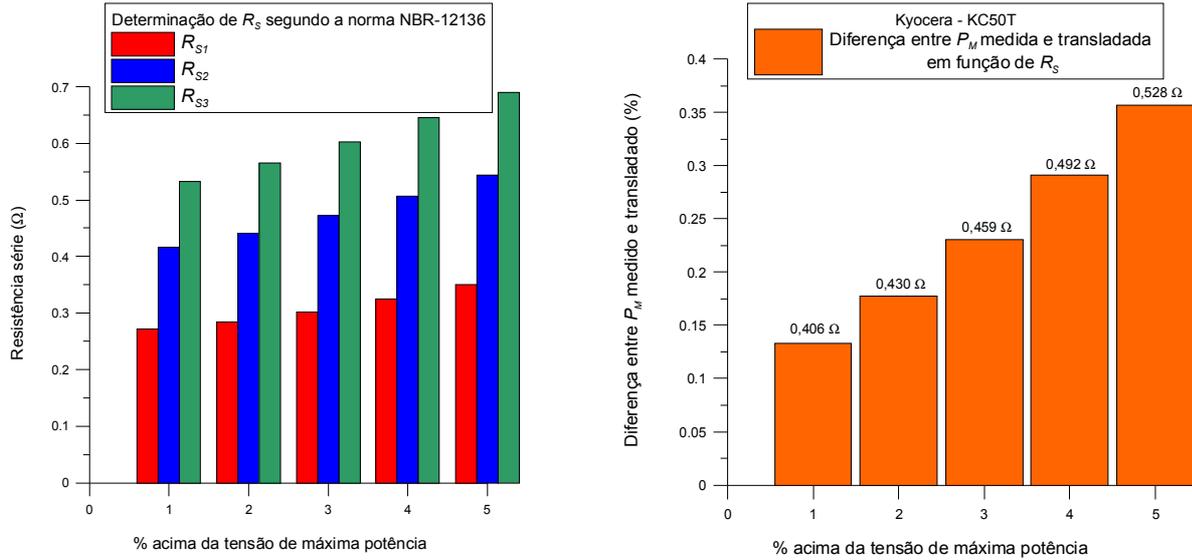


Figura 4: Valores individuais de R_S em função da porcentagem de tensão superior à de máxima potência medida na condição de translação em função da escolhida para o módulo KC50T.

Figura 5: Diferença entre a máxima potência transladada e a máxima potência medida na condição de translação em função da porcentagem de tensão escolhida.

SUGESTÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA SÉRIE A SER UTILIZADA NA NORMA NBR-12302

Observando a figura 4 verifica-se uma grande dispersão entre R_{S1} , R_{S2} e R_{S3} , que em teoria deveriam apresentar valores parecidos. Esta dispersão foi verificada em todos os módulos ensaiados, o que leva a conclusão de que o método para determinação de R_S pela norma ABNT não apresenta grande precisão. Paralelo a este fato, o método de determinação de R_S segundo a norma brasileira pode ser considerado trabalhoso e muitas vezes difícil de ser realizado vista a grande dependência das condições climáticas e de medida. É possível demonstrar que quanto maior a diferença entre as irradiâncias das curvas utilizadas para a determinação de R_S , menos influente é a incerteza na medida da temperatura e, portanto, melhor o resultado. Entretanto, existem inúmeros métodos de determinação da resistência série de um dispositivo fotovoltaico, algumas das quais podem ser encontradas em Bühler, (2007). Neste trabalho é feita a seguinte sugestão para a determinação da resistência série.

De acordo com a metodologia proposta por Phang *et. al.*, (1984), todos os parâmetros, segundo o modelo de um diodo, podem ser determinados a partir de uma única curva $I-V$. A partir de uma curva característica medida são obtidos os valores da tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), tensão (V_M) e corrente (I_M) de máxima potência. A inclinação da curva $V-I$ junto à região de circuito aberto (R_{S0}), muito influenciada pela resistência série é também determinada. A resistência paralela é considerada igual a inclinação da curva $V-I$ junto à região de curto-circuito, mas com sinal trocado. Após uma série de análises e simplificações é possível obter as equações (9) a (11), através das quais os parâmetros da curva são obtidos.

$$m = \frac{V_M + I_M R_{S0} - V_{OC}}{V_T \left[\ln \left(I_{SC} - \frac{V_M}{R_p} - I_M \right) - \ln \left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p} \right) + \frac{I_M R_p}{I_{SC} R_p - V_{OC}} \right]} \quad (9)$$

$$I_0 = \left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p} \right) \exp \left(\frac{-V_{OC}}{m V_T} \right) \quad (10)$$

$$R_S = \left(R_{S0} - \frac{m V_T}{I_0} \right) \exp \left(\frac{-V_{OC}}{m V_T} \right) \quad (11)$$

onde I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, m é o fator de idealidade, V_T é a tensão térmica e é igual a $N_s k_B T / e$, sendo e a carga do elétron, k_B a constante de Boltzmann, T a temperatura do dispositivo e N_s o número de células ligadas em série.

A fim de verificar a aplicabilidade do valor de R_S determinado segundo a equação (11) na translação de curvas segundo as equações da norma NBR-12302 foi realizado o seguinte procedimento: todos os módulos ensaiados foram transladados para uma condição na qual uma curva $I-V$ havia sido medida utilizando um valor de R_S determinado segundo o procedimento estabelecido pela norma brasileira e posteriormente utilizando o valor obtido pela equação (11). A curva utilizada para a determinação de R_S pela equação (11) foi sempre aquela que se pretendia transladar. As figuras 6 e 7 apresentam duas das translações realizadas para os módulos ensaiados com a resistência série determinada pelos dois métodos aqui descritos.

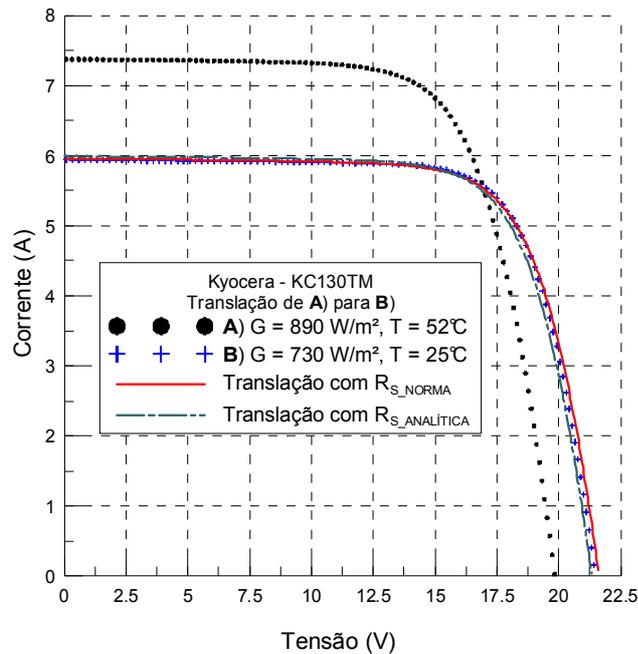


Figura 6: Módulo KC130TM medido em duas condições (890 W/m^2 , $52 \text{ }^\circ\text{C}$ e 730 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$) e curvas transladadas segundo a norma NBR-12302 com R_S determinado pela norma NBR-12136 e pela equação (11).

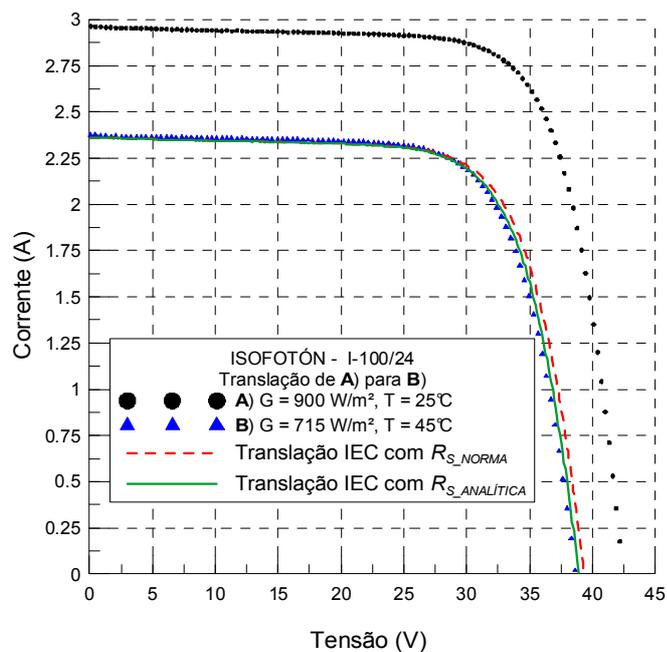


Figura 7: Módulo I-100/24 medido em duas condições (900 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e 715 W/m^2 , $45 \text{ }^\circ\text{C}$) e curvas transladadas segundo a norma NBR-12302 com R_S determinado pela norma NBR-12136 e pela equação (11).

Em todas as translações realizadas para os diferentes módulos ensaiados os resultados obtidos podem ser considerados muito bons tanto com a utilização de R_S , determinada pela norma quanto com R_S , determinado pelo método analítico. Para realizar uma análise mais apurada dos resultados obtidos das translações com diferentes valores de R_S , a máxima potência da curva transladada e da curva medida na condição de translação foi determinada para módulo ensaiado. As máximas potências medidas e determinadas nas translações, com ambos os valores de R_S , para os diferentes módulos ensaiados são apresentados na tabela 3.

A análise da tabela 3 mostra que adotando a resistência série determinada através do método analítico descrito neste trabalho, os resultados obtidos nas diferentes translações foram superiores em 5 dos 6 casos. Mesmo no único caso em a resposta da translação utilizando a resistência série do método analítico foi pior do que a resposta obtida com o método da norma, ainda assim pode ser considerado um resultado satisfatório para a translação. Desta forma, a utilização da norma NBR – 12302 poderia ser mais facilmente realizada, uma vez que toda a complexidade experimental associada à determinação de R_S poderia ser excluída. Determinando a resistência série por meio de um método, utilizando a curva a ser transladada, obtêm-se resultados mais satisfatórios do que seguindo a norma técnica.

Módulo	P_M - condição de translação (W)	R_S _NORMA (Ω)	P_M - translação com R_S norma (W)	Desvio (%)	R_S _ANALÍTICA (Ω)	P_M - translação com R_S Analítica (W)	Desvio (%)
KC50T	47,88	0,430	47,81	0,21	0,232	47,97	0,19
KC130TM	94,46	0,373	94,00	0,49	0,160	93,04	1,50
HG50S	43,81	0,436	43,59	0,50	0,183	43,77	0,08
HG135P	114,48	0,748	112,78	1,47	0,243	114,71	0,20
US32	33,91	1,580	33,69	0,63	0,452	33,97	0,179
I-100/24	65,81	1,398	67,07	1,93	0,730	66,19	0,59

Tabela 3 – Máxima potência determinada na curva transladada (norma NBR - 12302) com R_S obtido pela norma NBR 12136 e por método analítico e máxima potência da curva medida na condição de translação para cada módulo ensaiado

CONCLUSÕES

Foi realizado um estudo da translação proposta pela norma NBR-12302 para módulos de diferentes configurações e tecnologias. Foi também apresentada uma metodologia completa para a aplicação desta norma, incluindo a determinação do fator de correção da curva e da resistência série.

Foi realizado um estudo da possibilidade de substituição da determinação de R_S através do método proposto pela norma NBR por um método analítico apresentado neste trabalho. Foram realizadas translações de curvas $I-V$ aplicando a metodologia proposta pela norma NBR-12302 para todos os módulos ensaiados, fazendo uso de R_S obtido pela norma e pelo método analítico. Verificou-se que utilizando o método analítico para a determinação da resistência série, os resultados obtidos nas translações das curvas características são muito satisfatórios.

Conclui-se por fim, que uma alternativa interessante para a translação de curvas $I-V$ seria a aplicação das equações da norma NBR-12302, mas fazendo uso da resistência série determinada pelo método analítico, obtida a partir da curva a ser transladada. Essa alternativa, como foi apresentada neste trabalho, apresenta resultados muito bons e tem a vantagem de precisar de menos trabalho experimental do que no caso da aplicação completa das normas anteriormente citadas.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991a). NBR-12302 Módulos fotovoltaicos – Correção das curvas características corrente *versus* tensão ($I \times V$), em função da temperatura e radiação, Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991b). NBR-12136 Módulos fotovoltaicos – Determinação de características fotoelétricas, Rio de Janeiro.
- Alonso-Abella, M. (2002). Medida y evaluación de productos para el mercado fotovoltaico: Sistemas de bombeo fotovoltaico, trabajo tutelado, ETSIT-UPM, Madrid.
- Anderson, A. J. (1995). Final report for task 2.0 NREL subcontract N° TAD-4-14166-01, Oak Leaf Place.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (1996), ASTM E 1036-96. Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.
- Bühler, A. J. (2007). Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- IEC, (1987). International Electrotechnical Commission – IEC-891. Procedures irradiance correction to measured I-V characteristics of crystalline silicon devices for temperature and irradiance.
- Marion, B., Kroposki, B., Emery, K., Del Cueto, J., Myers, D. e Osterwald, C. (1999). Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL, NREL Technical Report 520-26909.
- Phang, J. C. H., Chan, D. S. H., Phillips, J.R. (1984). Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters, Eletronic Letters, vol. 20, n. 10, pp 406-408.
- Van Overstraeten, R. J., Mertens, R. P. (1986). Physic, technology and use of photovoltaics, Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston.

ABSTRACT

When a photovoltaic device $I-V$ curve is obtained in a non standard condition, or if one wants to predict its behavior in a different condition, it is necessary to apply some translation method. Both the Brazilian (NBR-12302) and the international (IEC-891) standards establish a method for $I-V$ curves translation, which is dependent of some parameters that must be experimentally determinate. The series resistance and the curve correction factor are two of these parameters. Although the standards establish a procedure for determination of these parameters they are not clear in respect to the series resistance. Beside this point these procedure are difficult to execute once it is necessary the determination of three $I-V$ curves with the same temperature, but different irradiance. This work presents a study of the results obtained applying the Brazilian standard for different technology modules. This work also proposes an alternative methodology for the series resistance determination in order to substitute the standards' method.

Keywords: Photovoltaic module, $I-V$ characteristic curve, $I-V$ curve translation, photovoltaic parameters.