

COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE TRANSLAÇÃO DE CURVAS I-V DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Alexandre José Bühler – purpleblind@yahoo.com.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A determinação da curva característica de corrente por tensão (I-V) é de fundamental importância na qualificação das propriedades elétricas de um dispositivo fotovoltaico. A determinação desta curva tem de ser feita sob condições específicas de temperatura e irradiância, condições estas muitas vezes difíceis de serem obtidas. 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 correção ou translação. Neste trabalho são estudados dois métodos de correção de curvas I-V para módulos fotovoltaicos. Um dos métodos consiste em uma translação geométrica, onde a curva é deslocada de forma a coincidir com os valores de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto, previamente calculados. No outro método de correção a corrente é deslocada por soma de um mesmo valor igual a todos os pontos enquanto a tensão é deslocada por um fator de proporção. Os dois métodos são comparados utilizando curvas de módulos fotovoltaicos comerciais. As curvas medidas são obtidas em diferentes condições de temperatura e irradiância, com grande grau de precisão na determinação dos parâmetros envolvidos. Foram encontrados resultados satisfatórios para ambos os métodos na translação de curvas I-V, embora o método envolvendo soma e proporção tenha apresentado resultados ligeiramente superiores.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Correção de curvas características I-V, Parâmetros Fotovoltaicos

1. INTRODUÇÃO

Para a análise do desempenho elétrico de um módulo fotovoltaico é imprescindível a determinação da curva (I-V) de corrente e tensão denominada curva característica. Através desta curva é possível obter importantes informações sobre as características elétricas de um gerador fotovoltaico das quais talvez a mais importante seja a máxima potência que o dispositivo é capaz de fornecer em uma dada condição de temperatura e irradiância. A determinação desta curva, segundo a norma internacional IEC-891 (1987) deve ser realizada dentro de condições específicas de temperatura e irradiância, denominada condição padrão de ensaio ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $AM = 1,5$ e $T = 25^\circ\text{C}$). Quando a curva I-V é obtida fora da condição padrão, ou quando se deseja conhecer o comportamento da curva em uma condição diferente da medida, se faz necessária a aplicação de algum método de correção. A norma internacional IEC-891, (1987) estabelece um método de correção para curvas I-V de dispositivos fotovoltaicos. Este método, entretanto, é limitado à correção de curvas características da condição medida para condições de temperatura e irradiância dentro de uma faixa de mais ou menos 30% dos valores medidos. O método proposto pela norma internacional também apresenta a dificuldade na determinação do fator de correção da curva (K) que requer a determinação de no mínimo três curvas características à mesma irradiância e com o mesmo espectro, mas em diferentes temperaturas. Outra dificuldade da aplicação do método proposto pela norma IEC-891 é a determinação da resistência série. Segundo a norma IEC-891 para determinar a resistência série são necessárias duas curvas com mesma temperatura, mas diferentes irradiâncias. Além de nem sempre ser fácil obter duas curvas com as características desejadas para a aplicação deste método, existe uma grande imprecisão associada, visto que não existe um critério bem definido para a escolha das tensões a partir das quais é calculado R_s . A norma apenas estabelece uma tensão “ligeiramente” superior à de máxima potência. As equações de correção segundo a norma internacional são apresentadas a seguir:

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

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

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 respectivamente a tensão e a corrente corrigidas para a condição de temperatura T_2 e irradiância G_2 , K é o fator de correção da curva, R_s é a resistência série do dispositivo fotovoltaico,

α é o coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura e β é o coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura. Vale ressaltar que a norma brasileira NBR12302 (ABNT, 1991) estabelece critérios praticamente idênticos à norma internacional no que diz respeito à translação de curvas I - V .

É possível encontrar na literatura diversos métodos de correção de curvas I - V . Alguns propõem a translação ponto a ponto dos valores medidos, tais quais Bleasser, (1995) 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). O problema da translação por meio analítico é que, em caso de módulos que apresentam imperfeições em suas curvas características, estas não são reproduzidas na translação, obtendo-se uma curva que não expressa a realidade a respeito do módulo. 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 que o fator de forma não seja alterado na translação, resultando em uma deformação na curva transladada e consequente 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 irradiância e temperatura limitando assim a faixa de translação. A partir desta matriz de curvas seriam também obtidos os coeficientes de variação da corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto com a temperatura. Dessa forma, o método de translação estabelecido pela norma americana modificada não resulta em erros muito grandes na região da máxima potência da curva, entretanto é um método bastante trabalhoso, uma vez que exige muitos ensaios para o dispositivo fotovoltaico a ser qualificado.

Um método proposto por Alonso, (2002) para correção de curvas I - V consiste basicamente na translação ponto a ponto dos valores medidos por intermédio de soma algébrica. Este método será aqui chamado de “*translação geométrica*”. Embora na maioria dos casos este método apresente bons resultados, a tensão é transladada por meio de soma, quando o mais correto seria uma translação por proporção. A diferença entre a translação da tensão por soma e por translação é muito sutil para módulos com curvas sem imperfeições, porém quando existe um “degrau de corrente” a diferença se torna significativa. Para uma melhor compreensão desta diferença, uma curva defeituosa de um módulo hipotético de 72 células em série foi gerada. Esta curva seria correspondente a uma irradiância de $G = 700 \text{ W / m}^2$ e temperatura de $T = 60^\circ\text{C}$. Posteriormente esta curva foi transladada para a condição padrão levando por meio de soma e de proporção na tensão. A Fig. 1 ilustra o exemplo.

Pode-se observar que para a translação por soma o degrau termina em uma tensão de aproximadamente $0,43 V_{OC}$, enquanto para a translação por proporção a tensão é de $0,32 V_{OC}$.

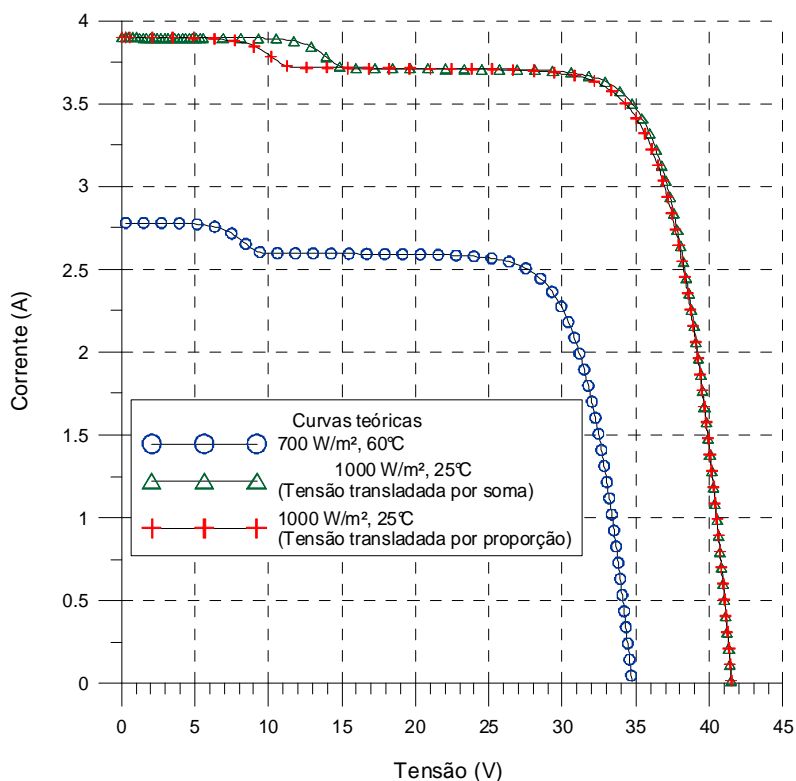


Figura 1 – Curva gerada analiticamente equivalente a 700 W / m^2 de irradiância e 60°C de temperatura, segundo o modelo de um diodo e translação da mesma por meio de soma e de proporção da tensão para a condição padrão.

Levando em conta esse fato, Krenzinger, (2004) propõe um método de translação capaz de evitar este problema. Este método de correção de curvas calcula a variação da tensão na translação por proporção e de corrente por soma, portanto será aqui chamado de método “*soma-proporção*”. O presente trabalho apresenta uma comparação entre os

métodos de translação geométrica e de soma-proporção bem como uma metodologia completa para análise de curvas características de módulos fotovoltaicos.

2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA I-V

Existem dois modelos muito utilizados para a representação de um dispositivo fotovoltaico, o modelo de um e de dois diodos. Para este trabalho foi adotado o modelo de um diodo. O circuito elétrico equivalente, segundo este modelo, contém um gerador de corrente representando a corrente elétrica fotogerada, um diodo representando a junção PN e duas resistências, representando as perdas de corrente (resistência paralela) e quedas de tensão (resistência série). A relação entre corrente elétrica e tensão, segundo o modelo aqui utilizado, é apresentada na Eq. (3).

$$I = I_{FG} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{mV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (3)$$

onde I é a corrente, V é a tensão, I_{FG} é a corrente fotogerada, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, m é o fator de idealidade do diodo, 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 absoluta do dispositivo e N_s o número de células em série no caso de módulos. A resistência série é representada por R_S , e a resistência paralela por R_p . Uma aproximação muito comum e que será feita neste trabalho é considerar a corrente fotogerada igual à corrente de curto-circuito.

A determinação dos parâmetros que compõem a Eq. (3) é importante para a análise da curva característica de um módulo fotovoltaico, pois dessa forma podem-se associar determinados fenômenos e imperfeições com os mesmos. Além disso, para o método de correção de curvas I-V proposto por Krenzinger, (2004) é necessário a elaboração de uma curva analítica sendo, portanto, necessária a determinação dos parâmetros que compõem esta curva.

São encontrados na literatura diversos métodos para a determinação dos parâmetros que compõem a Equação que descreve o comportamento de um dispositivo fotovoltaico. Alguns métodos necessitam a determinação de mais de uma curva característica em diferentes condições de temperatura e ou irradiância enquanto outros métodos necessitam apenas uma curva. Existe ainda a possibilidade de determinação desses parâmetros a partir de curvas obtidas com o módulo no escuro (Bühler, 2007).

Para a determinação dos parâmetros fotovoltaicos da curva I-V neste trabalho foi adotada a metodologia proposta por Phang *et. al.*, (1984) descrita a seguir.

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. As inclinações da curva V-I junto à região de curto-circuito (R_{p0}) e região de circuito aberto (R_{S0}), muito influenciada pela resistência série, também são determinadas. Considerando que a inclinação da curva V-I junto à região de curto-circuito é predominantemente influenciada pela resistência paralela, esta é aproximada por R_{p0} , mas com sinal trocado. Fazendo a derivada implícita da Eq. (3), da tensão com respeito à corrente, obtém-se a Eq. (4).

$$\frac{\partial V}{\partial I} = - \frac{mV_T (R_p + R_S) + R_p R_S I_0 \exp\left(\frac{V + IR_S}{mV_T}\right)}{mV_T + R_p I_0 \exp\left(\frac{V + IR_S}{mV_T}\right)} \quad (4)$$

Aplicando então as condições de $(0, V_{OC})$, $(I_{SC}, 0)$ e (I_M, V_M) na Eq.(3) e Eq. (4) obtêm-se as Eqs.(5) – (8):

$$I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{OC}}{mV_T}\right) - \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{mV_T}\right) \right] - I_{SC} \left(1 + \frac{R_S}{R_p} \right) + \frac{V_{OC}}{R_p} = 0 \quad (5)$$

$$(R_{S0} - R_S) \left[\frac{I_0}{mV_T} \exp\left(\frac{V_{OC}}{mV_T}\right) + \frac{1}{R_p} \right] - 1 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_p - R_S} + \frac{I_0}{mV_T} \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{mV_T}\right) = 0 \quad (7)$$

$$I_0 \exp\left(\frac{V_{OC}}{mV_T}\right) + \frac{V_{OC} - V_M}{R_p} - \left(1 + \frac{R_S}{R_p} \right) I_M - I_0 \exp\left(\frac{V_M - I_M R_S}{mV_T}\right) = 0 \quad (8)$$

Estas quatro equações não lineares podem ser resolvidas através de métodos numéricos como Newton-Raphson, entretanto fazendo as seguintes simplificações, o sistema pode ser resolvido analiticamente:

$$a) \quad \exp\left(\frac{V_{OC}}{mV_T}\right) \gg \exp\left(\frac{I_{SC}R_S}{mV_T}\right)$$

$$b) \quad R_p \gg R_s \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_p} \approx 1$$

$$c) \quad \frac{I_0}{mV_T} \exp\left(\frac{V_{OC}}{mV_T}\right) \gg \frac{1}{R_p}$$

$$d) \quad \frac{I_0}{mV_T} \exp\left(\frac{I_{SC}R_S}{mV_T}\right) \ll 1$$

Dessa forma, aplicando os dados obtidos da curva medida relativos a V_{OC} , I_{SC} , V_M , I_M , R_{p0} e R_{s0} obtêm-se o conjunto de equações apresentadas a seguir que permitem calcular com precisão os parâmetros de uma curva I - V segundo o modelo de um diodo.

$$m = \frac{V_M + I_M R_{s0} - V_{OC}}{V_T \left[\ln\left(I_{SC} - \frac{V_M}{R_p} - I_M\right) - \ln\left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p}\right) + \frac{I_M R_p}{I_{SC} R_p - V_{OC}} \right]} \quad (9)$$

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

$$R_s = \left(R_{s0} - \frac{mV_T}{I_0}\right) \exp\left(\frac{-V_{OC}}{mV_T}\right) \quad (11)$$

3. MÉTODO DE TRANSLAÇÃO GEOMÉTRICA

O método de translação geométrica baseia-se no conceito de que a curva característica de um dispositivo fotovoltaico é modificada unicamente devido à variação de temperatura e irradiância. A utilização deste método implica que todos os pontos da curva sejam deslocados igualmente na tensão e na corrente, de forma que os novos valores de tensão de circuito aberto e de corrente de curto-circuito coincidam com os valores calculados segundo a Eq. (12) e Eq. (13). Vale lembrar que embora o acréscimo ou decréscimo na tensão e na corrente seja o mesmo ao longo da curva I - V isso não evita que o fator de forma varie na translação.

A translação geométrica pode ser descrita pelos seguintes passos:

- a) São calculados os novos valores de tensão de circuito aberto e de corrente de curto-circuito por meio da Eq. (12) e Eq. (13), respectivamente;

$$V_{OC2} = V_{OC1} + \beta(T_1 - T_2) \frac{N_s m k_B T_1}{e} \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) \quad (12)$$

$$I_{SC2} = I_{SC1} \frac{G_2}{G_1} (1 + \alpha(T_2 - T_1)) \quad (13)$$

- b) Transladam-se os valores de corrente de acordo com a Eq. (14).

$$I_{TR_GEO} = I_1 + (I_{SC2} - I_{SC1}) \quad (14)$$

- c) É calculado um valor de tensão de circuito aberto auxiliar (V_{OC_AUX}) a partir dos pontos relativos à corrente transladada e de tensão medida.

d) Cada ponto de tensão é então transladado de acordo com a Eq. (15).

$$V_{2GEO} = V_1 + (V_{OC2} - V_{OC_AUX}) \tag{15}$$

e) Uma vez que a tensão é deslocada ponto a ponto, a corrente de curto-circuito é alterada devido à inclinação da curva *I-V* naquela região. Desta forma se faz necessário deslocar novamente a corrente, ponto a ponto, por meio de um fator de correção apresentado na Eq. (16).

$$I_{2GEO} = I_{TR_GEO} + \left(\frac{V_{OC_AUX} - V_{OC2}}{R_p} \right) \tag{16}$$

A nomenclatura relativa às Equações (12) a (16) é apresentada a seguir:

- V_{2GEO} = Tensão corrigida para a condição padrão ou outra qualquer segundo o método de translação geométrica;
- V_{OC1} = Tensão de circuito aberto na condição medida;
- V_{OC2} = Tensão de circuito aberto na condição padrão ou outra para a qual se deseja transladar;
- V_{OC_AUX} = Tensão de circuito aberto relativa à tensão medida e a corrente transladada;
- I_{2_GEO} = Corrente corrigida para a condição padrão ou outra qualquer segundo o método de translação geométrica;
- I_{SC2} = Corrente de curto-circuito na condição padrão ou outra qualquer para a qual se deseja transladar;
- I_{TR_GEO} = Corrente transladada por meio da Eq.(14);

Vale ressaltar que a correção proposta para a corrente transladada, Eq. (16), pode ser desprezada quando a correção da curva não apresentar uma diferença grande de temperatura (inferior a 10°C) ou quando a resistência paralela for consideravelmente alta (superior a 1000 Ω).

Como forma de apresentar a eficácia da metodologia proposta para a translação das curvas pelo método geométrico foram geradas duas curvas segundo o modelo de um diodo. A fim de facilitar a visualização de cada passo da metodologia proposta, as curvas foram geradas para um módulo de 72 células com um valor relativamente baixo de resistência paralela (100 Ω) e em condições extremas de operação. Na primeira condição a curva foi gerada para uma irradiância de 700 W/m² e temperatura de 70°C e a condição de translação considerada foi de 1100 W/m² e temperatura de 20°C.

A Fig. 2 ilustra o método de translação geométrico a partir de uma curva gerada matematicamente relativa à uma condição extrema de operação comparando com uma curva também gerada matematicamente em outra condição de temperatura e irradiância.

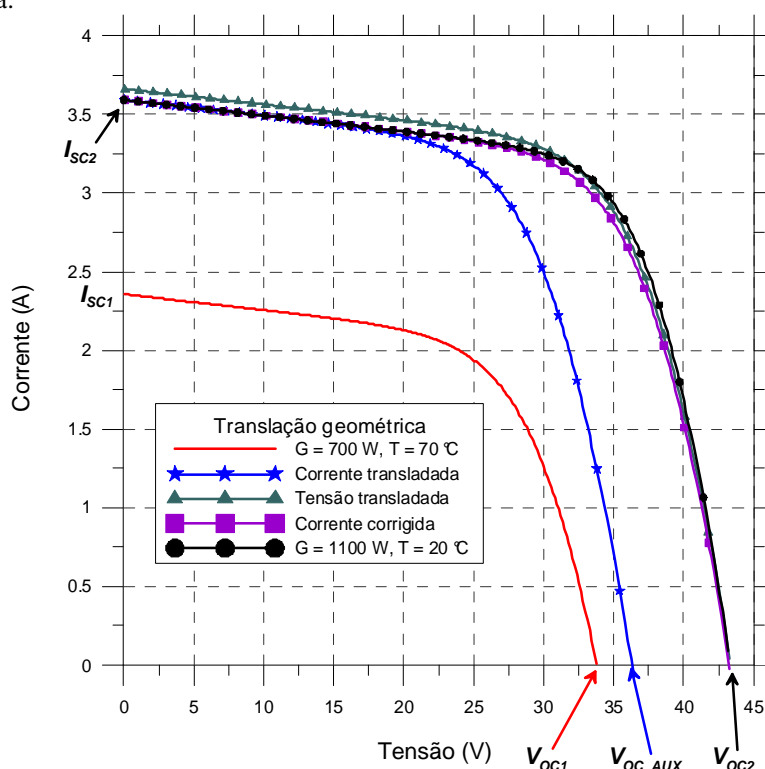


Figura 2 – Curvas geradas analiticamente segundo o modelo de um diodo e metodologia proposta para a translação de curvas *I-V* segundo o método geométrico.

4. MÉTODO DE TRANSLAÇÃO SOMA-PROPORÇÃO

O método de translação geométrico retorna resultados satisfatórios, como inclusive será aqui apresentado, entretanto o fato da tensão ser deslocada por soma e não por proporção pode acarretar erros consideráveis, principalmente em módulos com defeitos, módulos que apresentem imperfeições em suas curvas características. Além disso, o método de translação geométrica não apresenta bons resultados junto à região de máxima potência para translações em condições extremas de operação. Buscando um método mais preciso na região de máxima potência e que translate a corrente por soma e a tensão por proporção, foi elaborado um método (Krenzinger, 2004) que é descrito a seguir.

A translação pelo método proposto pode ser descrita pelos seguintes passos:

- São calculados os novos valores de tensão de circuito aberto e de corrente de curto-circuito por meio da Eq. (12) e Eq. (13), respectivamente;
- A corrente é transladada (I_{2SP}) por meio da Eq. (14);
- É calculado um valor de tensão de circuito aberto auxiliar (V_{OC_AUX}) a partir dos pontos relativos à corrente transladada e de tensão medida;
- A tensão é translada por proporção de acordo com a Eq. (17);

$$V_{TR_SP} = V_1 \left(\frac{V_{OC2}}{V_{OC_AUX}} \right) \quad (17)$$

- É obtida uma tensão relativa à máxima potência (V_{M_AUX}) da curva formada pela corrente e pela tensão transladadas;
- Da curva medida, são obtidos os parâmetros fotovoltaicos necessários para gerar uma curva analítica, de acordo com o procedimento anteriormente descrito. Dos parâmetros analíticos obtidos, a corrente de curto-circuito, a tensão térmica e a corrente de saturação reversa são recalculadas para a condição de translação. A corrente de saturação reversa é obtida por meio de aproximação pela Eq. (18). Uma vez gerada a curva analítica, é então obtida sua tensão (V_{M_AN}) e corrente (I_{M_AN}) de máxima potência;

$$I_{O2} = \frac{I_{SC2} - \frac{V_{OC2}}{R_p}}{\exp\left(\frac{V_{OC2}}{mV_{T2}}\right)} \quad (18)$$

- Por fim a corrente elétrica transladada é multiplicada ponto a ponto por um fator de correção e somada à tensão transladada, resultando dessa forma na tensão corrigida, tal qual apresentado pela Eq. (19)

$$V_{2SP} = V_{TR_SP} + I_{2SP} \frac{V_{M_AN} - V_{M_AUX}}{I_{M_AN}} \quad (19)$$

A Fig. 3 ilustra o método de translação soma-proporção a partir de uma curva gerada matematicamente relativa a uma condição extrema de operação, comparando com uma curva também gerada matematicamente em outra condição de temperatura e irradiância. Vale ressaltar que a condição para a qual foi gerada a curva I - V da Fig. 3 é sabidamente uma condição que muito dificilmente seria encontrada com um módulo em operação. Tal condição de temperatura e irradiância apenas foi escolhida de forma a facilitar a visualização da diferença entre os métodos de translação geométrico e soma-proporção. É possível, dessa forma, verificar que a translação por soma-proporção apresenta um melhor resultado junto à região de máxima potência do que o método de translação geométrico.

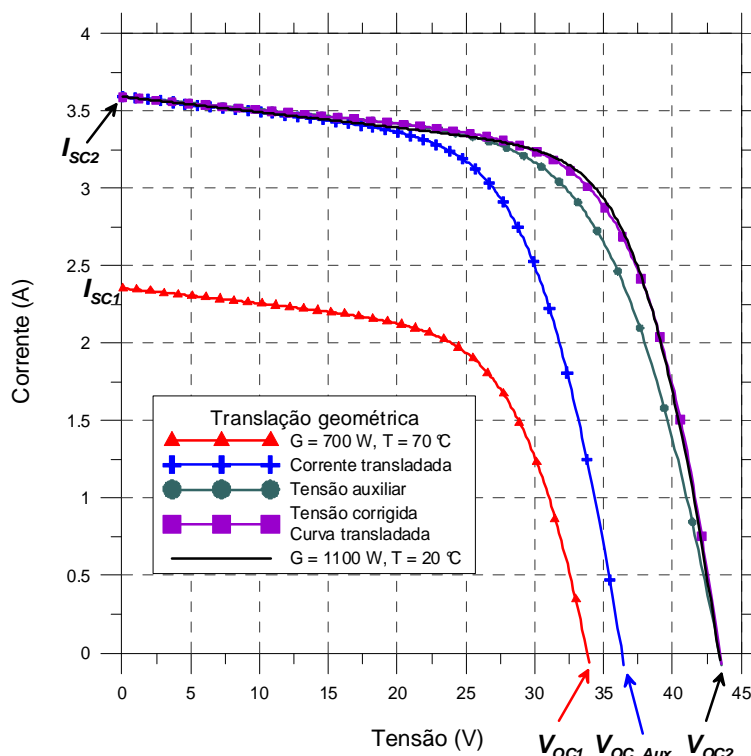


Figura 3 – Curvas geradas analiticamente segundo o modelo de um diodo e método de translação soma-proporção.

5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios para a determinação de curvas I - V foram feitos sob iluminação natural em dias de céu limpo e velocidade de vento desprezível. Para a medida da irradiância incidente no módulo em ensaio é utilizada uma célula de referência previamente calibrada que é fixada junto ao módulo de forma coplanar. Durante todos os ensaios os módulos são colocados em um lugar amplo, longe de obstáculos e aproximadamente a 1 metro do solo.

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 $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Para a medida da temperatura é utilizado um sensor tipo PT 100 classe A, fixado na parte de trás do módulo com auxílio de pasta térmica a fim de garantir um bom contato, em uma célula central.

Para a aquisição de curvas em diferentes temperaturas é utilizada a própria radiação solar como fonte de energia térmica. Curvas em diferentes irradiâncias são obtidas a partir de ensaios realizados em diferentes horas do dia, e sob diferentes ângulos de incidência, sempre respeitando um ângulo máximo de 30° entre a normal do plano do módulo e o feixe de luz incidente.

Para as medidas de tensão, corrente e irradiância foram utilizados multímetros da marca Hewlett Packard modelo 34401A. Estes multímetros são ligados a um micro-computador através de uma interface GPIB. A precisão de medida é de $10 \mu\text{V}$ (resolução de $4 \frac{1}{2}$ 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 2 segundos. Uma descrição mais completa da técnica de aquisição de dados utilizada pode ser encontrada em Prieb (2002).

Para aumentar a precisão na determinação da inclinação da curva I - V junto à região de curto-circuito e, conseqüentemente, na determinação de R_p todos os ensaios com módulos de silício cristalino foram realizados sem diodos de *bypass*.

Foram realizados ensaios para a determinação do coeficiente de variação da tensão de circuito aberto para todos os módulos testados. Em todos os ensaios a irradiância mínima ao qual o módulo foi exposto foi de 900 W/m^2 e a máxima variação admitida ao longo do ensaio foi de 30 W/m^2 . Estes ensaios se fazem necessários uma vez que β é um parâmetro necessário e muito importante no processo de translação de uma curva I - V . A determinação da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura é descrita pelas seguintes etapas:

- Determinar uma curva característica do módulo em uma temperatura e irradiância quaisquer;
- Determinar o fator de idealidade do módulo segundo a metodologia já descrita;
- Anexar um sensor para medição da temperatura junto ao dispositivo em ensaio.
- Colocar o módulo em um lugar amplo, acima da superfície a fim de evitar aquecimento não homogêneo por convecção e longe de obstáculos que possam permitir que algumas células recebam mais irradiância do que outras;
- Anexar uma célula de referência ao dispositivo em ensaio, coplanar ao mesmo;

- f) Medir a temperatura e irradiância incidente no módulo, preferencialmente de forma simultânea ou na menor diferença de tempo possível;
- g) Corrigir a variação da tensão pela irradiância de acordo com a Eq. (12);
- h) Plotar uma curva de tensão de circuito aberto *versus* temperatura e a partir da inclinação da mesma determinar o coeficiente β .

A Fig. 4 ilustra um ensaio realizado para a determinação de β utilizando irradiância solar tanto para a polarização do módulo quanto para o aquecimento do mesmo. A mesma figura apresenta também a variação da irradiância ao longo do ensaio.

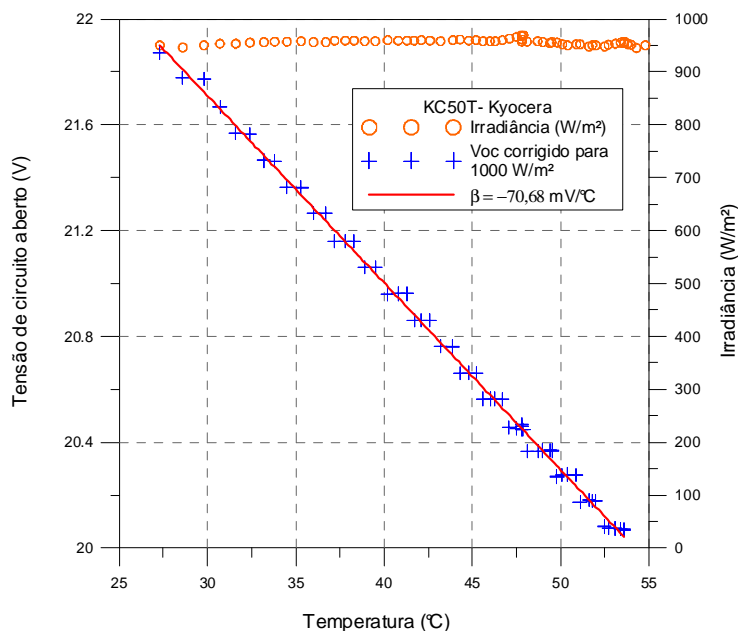


Figura 4 – Determinação da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura para um módulo de silício multicristalino de 36 células, bem como variação da irradiância ao longo do ensaio.

Para o coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura foram assumidos valores típicos, $0,06 \% I_{SC} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para silício cristalino e $0,08 \% I_{SC} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para silício amorfo. Para cada um dos módulos utilizados foram determinadas duas curvas características em diferentes condições de temperatura e irradiância. Em todos os casos uma das curvas é considerada como a condição medida e a outra como a condição para a qual a curva foi transladada segundo os dois métodos aqui analisados.

Para o pós-processamento das curvas *I-V* foi desenvolvido um programa em linguagem Visual Basic utilizando a interface da planilha eletrônica Excel (macro). Este programa foi desenvolvido de forma a possibilitar a determinação com grande precisão de todos os parâmetros de interesse da curva característica de um módulo bem como a aplicação dos métodos de translação geométrica e soma-proporção. Os procedimentos utilizados pelo programa desenvolvido são sucintamente descritos a seguir:

- a) Selecionam-se 6 pontos com corrente maior e 6 pontos com corrente menor do que zero e a partir de uma regressão linear por mínimos quadrados é obtido o valor de V_{OC} e de R_{SO} .
- b) Selecionam-se pontos entre uma região de tensão $-5\% V_{OC}$ e $+5\% V_{OC}$ e é então aplicada uma regressão linear por mínimos quadrados a partir da qual são obtidos os valores de I_{SC} e de R_P .
- c) Selecionam-se 10 pontos com tensão maior e 10 com valor menor do que a tensão relativa ao produto ponto a ponto dos valores de tensão e corrente medidos. É então aplicada uma regressão polinomial de ordem 2 a partir da qual são obtidos os valores de V_M e I_M .
- d) Os parâmetros da curva relativos ao modelo de um diodo são obtidos segundo a metodologia já descrita neste trabalho.
- e) A corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, tensão térmica e corrente de saturação reversa são calculados para a condição de translação desejada.
- f) A curva é então transladada pelos métodos geométrico e de soma-proporção.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Foram usados para os ensaios módulos das marcas Isofotón modelo I-100 (100 W / 24 V), Kyocera modelo KC50T (50 W / 12 V), Himin Solar modelo HG65 (65 W / 12 V) e Uni-Solar modelo US32 (32 W / 12 V). As Figs. 5 a 8 apresentam as curvas medidas em duas condições de diferentes temperaturas e irradiâncias para os quatro módulos ensaiados onde foram aplicados os dois métodos de translação analisados neste trabalho.

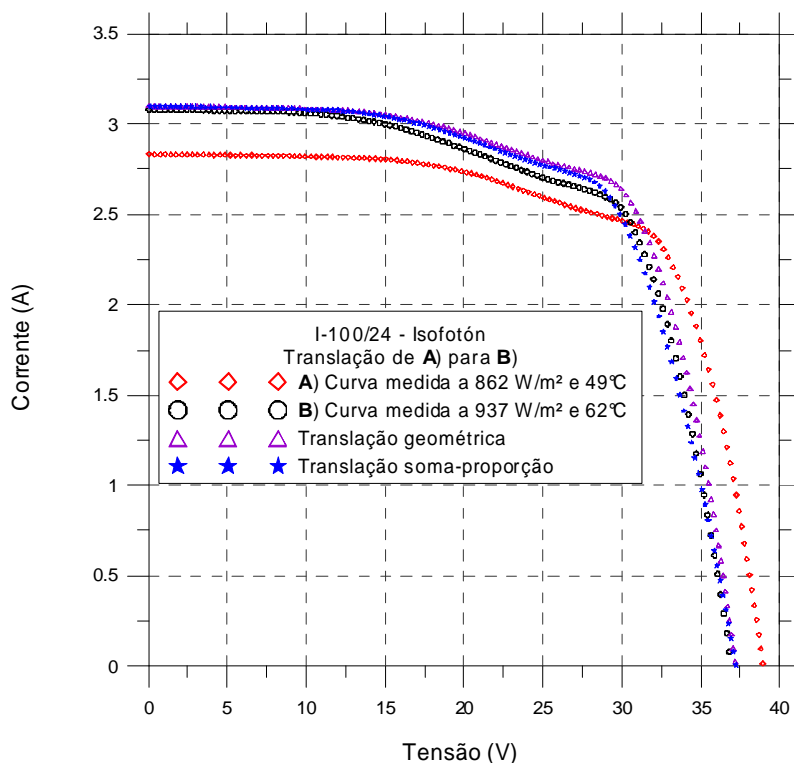


Figura 5 – Módulo de silício monocristalino de 72 células (I-100/24 - Isofotón), com célula defeituosa, medido em duas condições (862 W/m², 49°C e 937 W/m², 62°C) e curvas transladas pelos métodos geométrico e soma-proporção.

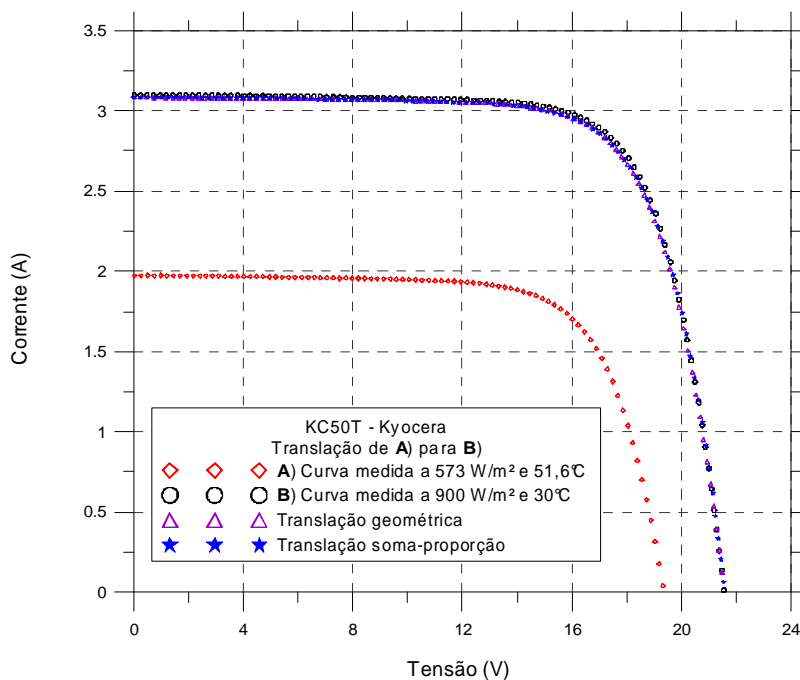


Figura 6 – Módulo de silício multicristalino de 36 células (KC50T-Kyocera) medido em duas condições (573 W/m², 51,6°C e 900 W/m², 30°C) e curvas transladas pelos métodos geométrico e soma-proporção.

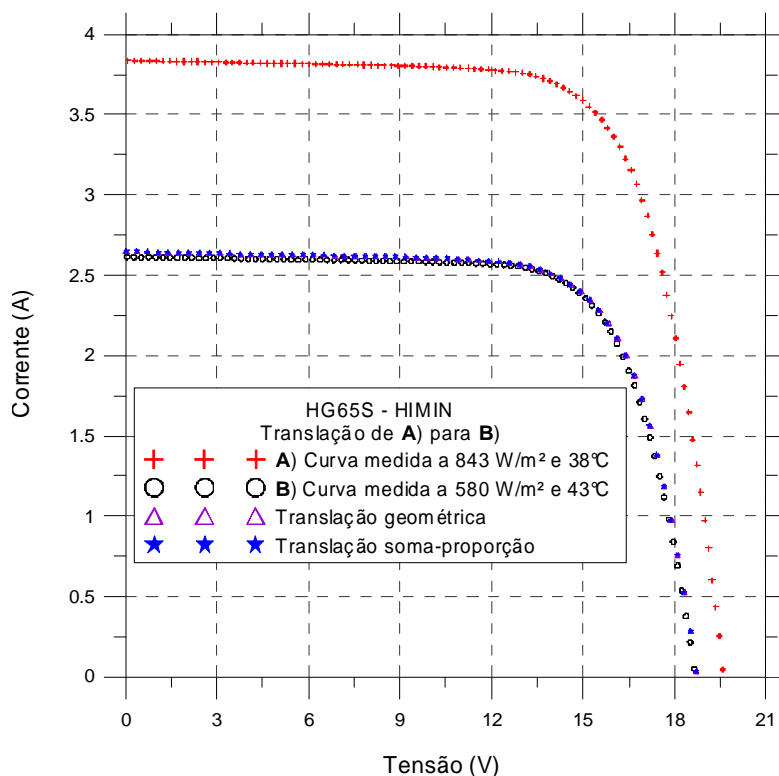


Figura 7 – Módulo de silício multicristalino de 36 células (HG65S-Himin) medido em duas condições (843 W/m², 38°C e 580 W/m², 43°C) e curvas transladadas pelos métodos geométrico e soma-proporção.

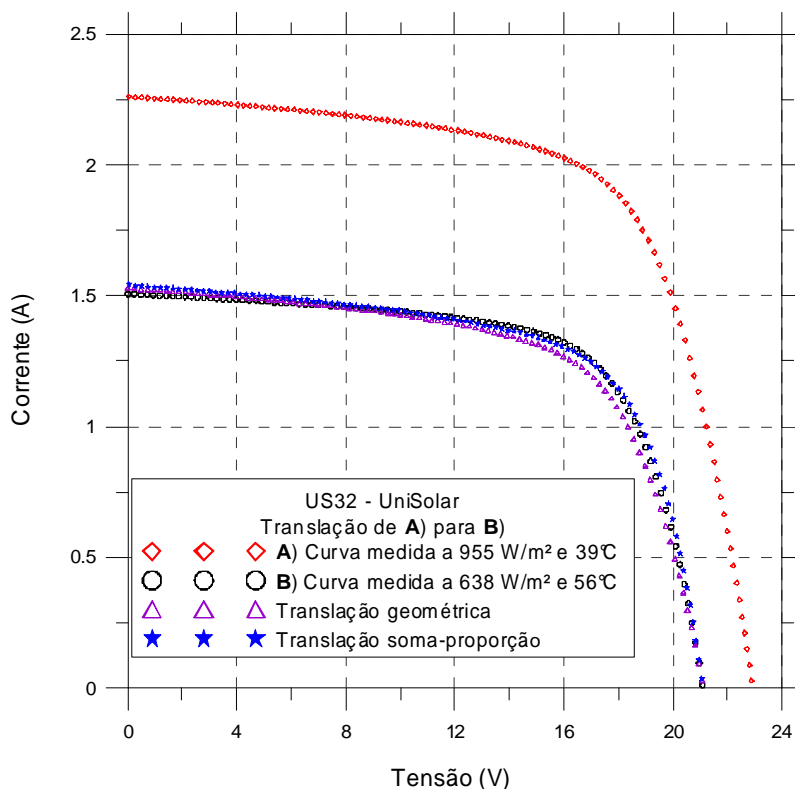


Figura 8 – Módulo de silício amorfo (US32 – Uni Solar) medido em duas condições (955 W/m², 39°C e 638 W/m², 56°C) e curvas transladadas pelos métodos geométrico e soma-proporção.

Após a translação das curvas de cada módulo ensaiado, foram determinadas as máximas potências relativas a cada método de translação aplicado. Os valores foram comparados com os valores medidos e são apresentados na Tab. 1.

Analisando a Tab. 1 pode-se verificar que o método de translação por soma-proporção apresentou resultados superiores ao método geométrico em todos os casos. Em nenhuma situação a diferença entre a potência estimada e a potência medida foi superior a 2% o que comprova uma grande precisão do método. Observa-se, entretanto, que em nenhuma situação esta diferença para o método geométrico chegou a 5%, o que significa que este método também pode ser utilizado para a correção de curvas com elevada precisão, principalmente para módulos de silício cristalino e que não apresentem imperfeições em suas curvas *I-V*.

Tabela 1. Valores de máxima potencia medidos na condição de translação e calculados segundo o modelo geométrico e soma-proporção.

Módulo	Máxima potência medida na condição de translação (W)	Máxima potência (translação geométrica) (W)	Desvio percentual	Máxima potência (translação soma-proporção) (W)	Desvio percentual
Isofotón	76,017	79,104	4,06%	76,040	0,03%
Kyocera	49,375	48,407	1,96%	48,454	1,86%
Himin	35,601	35,737	0,38%	35,606	0,02%
Uni-Solar	21,340	20,328	4,74%	21,099	1,12%

7. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia completa para a análise de curvas características de módulos fotovoltaicos, bem como para a translação das mesmas para diferentes condições de temperatura e irradiância. Foram testados dois métodos de translação de curvas aplicados a quatro módulos de diferentes configurações e tecnologias, ensaiados sob condições de iluminação natural. Ambos os métodos apresentaram resultados satisfatórios, entretanto o método de translação soma-proporção apresentou melhores resultados em todas as situações estudadas.

A não determinação de α , (a opção de escolher de um valor típico para cada tecnologia estudada) não comprometeu os resultados, uma vez que os desvios na máxima potência obtidos entre os métodos de translação e os valores medidos foram muito pequenos. A diferença entre a potência transladada pelo método de soma-proporção e medida, na condição de translação, apresentou-se muito pequena, na pior das situações ainda inferior a 2%.

A metodologia adotada para a determinação de β apresentou resultados satisfatórios quando na utilização deste coeficiente nos métodos de translação analisados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e da ELETROBRÁS.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT, 1991. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR12302/NBR1386. Dispositivos Fotovoltaicos – Correção da Curvas Característica Corrente versus Tensão (*I x V*) em função da temperatura e irradiância. 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, 1996. American Society for Testing and Materials, ASTM E 1036-96. Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.
- Bleasser, G., 1995. PV array translation procedure, Proc. 13th EC PVSEC.
- 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.
- Krenzinger, A., 2004. Programa de pós-processamento de dados para ensaios de módulos fotovoltaicos, XII Congreso Ibérico y VII Congreso Íbero Americano de Energía Solar, pp 763-768, Vigo, Espanha.
- 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, *Electronic Letters*, vol. 20, n. 10, pp 406-408.
- Prieb, C. W. M., 2002, Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- Van Overstraeten, R. J., Mertens, R. P., 1986. *Physic, technology and use of photovoltaics*, Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston.

COMPARISON BETWEEN DIFFERENT TRANSLATION METHODS FOR PV MODULE I-V CURVES

Abstract. *The determination of the current versus voltage characteristic curve (I-V) is very important to qualify the electrical properties of a photovoltaic device. This determination must be done in specific temperature and irradiation conditions; however these conditions are usually difficult to be obtained. In the case of the I-V curve have been measured in a non standard condition, it is necessary that some correction method be applied. In this work two translation methods for I-V curves are studied. One method consists in a geometric translation, where the curve is displaced in order to coincide with the open circuit voltage and short circuit current previously calculated. In the other translation method, the current is displaced by summing and the voltage by proportioning. The two methods are compared using measured I-V curves of photovoltaic commercial modules. The measured curves are obtained in different irradiance and temperature conditions with good accuracy of the involved parameters. The results show that both the studied methods can be applied in order to translate an I-V curve, however the method with sum and proportion presented slightly better results in all the cases.*

Keywords: Photovoltaic solar energy, Correction of characteristics I-V curves, Photovoltaic parameters.