

# DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA PÓS-PROCESSAMENTO DE CURVAS I-V DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Alexandre J. Bühler – purpleblind@yahoo.com.br  
Guilherme F. Cervantes - guilhermecervantes@gmail.com  
Arno Krenzinger - arno.krenzinger@ufrgs.br  
Laboratório de Energia Solar  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500 Porto Alegre RS  
www.solar.ufrgs.br

**Resumo.** *A energia solar fotovoltaica tem crescido muito nos últimos tempos, principalmente na Europa, mas também em países como os Estados Unidos, Japão e China. Na América do Sul, o cenário fotovoltaico ainda está muito longe dos patamares europeus, por exemplo, mas considerando o potencial solar existente neste continente e a consolidação que esta fonte de energia tomou nos últimos tempos, seu futuro é promissor. Neste cenário, e tendo em vista qualquer previsão para o futuro no mundo, fica claro que a caracterização de módulos fotovoltaicos de forma eficaz e confiável é de suma importância na implementação de novas instalações e averiguação do desempenho das instalações já existentes. 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 vários parâmetros do gerador fotovoltaico como a corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e o ponto de máxima potência ( $P_M$ ). Para que esses e outros parâmetros sejam obtidos é necessário que um pós-processamento seja efetuado na curva I-V medida, o que normalmente necessita de um tempo considerável e um profissional com bom grau de conhecimento na área. Este trabalho apresenta um programa computacional desenvolvido junto ao Laboratório de Energia Solar (Labsol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para pós-processamento de curvas I-V de dispositivos fotovoltaicos. Encontram-se disponíveis neste software a determinação de diversos parâmetros elétricos e fotovoltaicos a partir de uma curva I-V, bem como a translação desta curva para uma condição qualquer de irradiância e temperatura.*

**Palavras chave:** Módulos fotovoltaicos, Curva I-V, Caracterização de dispositivos fotovoltaicos, Software de pós-processamento

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as chamadas fontes não convencionais de energia, a energia solar fotovoltaica tem ganhado um espaço cada vez maior em todo o mundo nos últimos anos. A indústria de células fotovoltaicas vem experimentando um crescimento anual muito forte ao longo dos últimos anos, expandindo-se também para sistemas isolados, mas principalmente para sistemas conectados à rede elétrica. Para se ter uma idéia, no ano de 2000 a potência instalada fotovoltaica no mundo era de cerca de 1400 MW. Ao final de 2009 a potência instalada chegou próxima da casa dos 23000 MW. Do total da potência fotovoltaica instalada no mundo, a grande maioria se encontra concentrada na Europa (cerca de 70%) onde a Alemanha, com mais de 9700 MW representa o país com a maior potência instalada, (EPIA, 2010).

Para a análise do desempenho elétrico de um módulo fotovoltaico é necessária a determinação de uma curva I-V (corrente *versus* tensão) denominada curva característica. Através desta curva é possível obter importantes informações sobre as características elétricas do gerador fotovoltaico como a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e o ponto de máxima potência ( $P_M$ ). A determinação desta curva, segundo a norma internacional IEC-891 (IEC 1987), deve ser realizada dentro de condições específicas de temperatura e irradiância incidente denominada condição padrão de ensaio ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $AM = 1,5$  e  $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Se a curva for determinada fora da condição padrão, que muitas vezes é difícil de ser obtida, a mesma precisa ser transladada. A própria norma IEC-891 estabelece equações de translações, que podem ser utilizadas para que se conheça o comportamento da curva I-V em uma condição de temperatura e irradiância diferente da medida (a curva pode ser transladada para uma irradiância de até  $\pm 30\%$  do valor medido).

Por meio da curva I-V também é possível que sejam determinados os chamados parâmetros fotovoltaicos, que correspondem aos parâmetros utilizados nas equações que descrevem a relação entre tensão e corrente em um dispositivo fotovoltaico. Esses parâmetros são normalmente referentes a dois modelos elétricos, o modelo de um diodo e o modelo de dois diodos. O modelo de um diodo, por exemplo, possui os seguintes parâmetros fotovoltaicos: resistência série ( $R_S$ ), resistência paralela ( $R_P$ ), fator de idealidade do diodo ( $m$ ), corrente de saturação reversa ( $I_0$ ) e corrente fotogerada ( $I_{ge}$ ). Existem inúmeros métodos de determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de uma curva I-V medida, tanto utilizando o modelo de 1 diodo, como por exemplo Phang et al., (1984) e, como o modelo de 2 diodos, Chan e Phang, (1987). Uma vez que esses métodos normalmente utilizam como dados de entrada parâmetros elétricos obtidos diretamente da curva medida, como a corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto e a máxima potência, é importante que uma cuidadosa etapa de pós-processamento seja aplicada nos dados medidos referentes à

curva  $I$ - $V$ . Além disso, é importante ressaltar que o pós-processamento deve ser realizado também com outras finalidades, como por exemplo, filtrar possíveis ruídos presentes nos dados medidos, realizar uma extrapolação adequada dos dados medidos, quando isto se fizer necessário, ou ainda eliminar a influência de possíveis diodos de *bypass*. Esses diodos influenciam drasticamente a forma da curva no primeiro quadrante, de forma que se a região da curva utilizada para calcular  $I_{SC}$  e  $R_p$  englobar a área de atuação desses diodos, isto pode levar a resultados completamente equivocados. Este comentário só é válido se a determinação de  $I_{SC}$  e  $R_p$  estiver ligada a inclinação da curva na região de  $I_{SC}$ .

O presente trabalho apresenta um programa computacional desenvolvido junto ao Laboratório de Energia Solar (Labsol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para pós-processamento de curvas  $I$ - $V$  de dispositivos fotovoltaicos. Por meio deste software dados medidos de tensão e corrente podem ser tratados de forma a fornecer, com grande precisão, os diferentes parâmetros elétricos e fotovoltaicos, na condição medida ou em outra condição desejada, esta última efetuada por meio de um processo de translação que pode ser realizado segundo dois métodos diferentes, o método da norma IEC e o método geométrico (Bühler e Krenzinger, 2008).

## 2. SISTEMA DE MEDIDA DE CURVAS $I$ - $V$ UTILIZADO NO LABSOL

O processo de caracterização de módulos fotovoltaicos utilizado no Labsol se baseia na utilização de iluminação natural. A corrente e a tensão são medidas com uma resolução de 6 ½ dígitos. Em ensaios de módulos, a temperatura do mesmo é medida em uma célula central na parte traseira, com um sensor Pt100. A incerteza associada à medida da temperatura, levando em conta o instrumento de medida e o sensor utilizado, é de 0,26 °C. O tempo total para aquisição de um conjunto de 1000 pares de tensão e corrente, que é o padrão utilizado, é de 200 ms. Cabe ressaltar que o tempo total da medida está ligado ao n° de pontos que se pretende medir e a resolução da medida.

O equipamento de medida de curvas  $I$ - $V$  desenvolvido no Labsol é apresentado na Figura 1. Este sistema, que é descrito detalhadamente em Gasparin (2009), possui como carga eletrônica uma fonte bipolar de quatro quadrantes da marca KEPCO, modelo BOP 100-10 MG. As funções da fonte são programadas remotamente por meio de um programa de gerenciamento que permite grande flexibilidade nas aplicações. A fonte tem potência máxima de 1000 W com limites de  $\pm 100$  V e  $\pm 10$  A, permitindo caracterizar módulos e arranjos dentro desta faixa de operação. Através de comandos enviados por um programa de gerenciamento, esta fonte é programada com um valor inicial e final de uma rampa de tensão com variação linear que pode tanto ter direção de  $I_{SC}$  para  $V_{OC}$  como de  $V_{OC}$  para  $I_{SC}$ . O padrão utilizado é o sentido de  $I_{SC}$  para  $V_{OC}$  mantendo o dispositivo em ensaio em circuito aberto enquanto a medida não é realizada.



Figura 1 – Sistema para medida de curvas características de dispositivos fotovoltaicos utilizados no Labsol (Gasparin, 2009).

As medidas de tensão e corrente são feitas simultaneamente e de forma sincronizada com uma rampa de tensão. A corrente é medida por meio de um resistor tipo shunt (300 mV / 10 A) e classe de precisão 0,5%. Para a medida de tensão e corrente são utilizados multímetros da marca Agilent, modelo 3458. Estes multímetros possuem

resolução máxima de 8 ½ dígitos e memória interna para até 10240 medidas. Na escala de 100 V e 6 ½ dígitos, que é a utilizada no sistema, apresentam resolução de 100  $\mu$ V para a tensão. A resolução de medida da corrente é de 30  $\mu$ A.

As medidas de irradiância e temperatura são feitas através de multímetros da marca Agilent, modelo 34410 A. A resolução máxima deste equipamento é de 6 ½ dígitos. O tempo de integração mínimo para a medida de tensão DC é de 100  $\mu$ s. A memória interna tem capacidade de armazenar até 50000 leituras.

Para a medida da irradiância é utilizada uma célula de referência de silício monocristalino previamente calibrada. Esta célula apresenta corrente de curto-circuito de 122,8 mA para 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância. A corrente gerada pela célula é medida através de um resistor de 0,2504  $\Omega$ , resultando em uma relação de 30,750 mV para 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância. Os dados medidos são exportados através de um arquivo com extensão “.dat”, que possui a forma tal como apresentada na Tabela 1. Os dados apresentados na Tabela 1 correspondem a dados reais medidos, porém somente os cinco primeiros valores de tensão, corrente e irradiância são apresentados.

Tabela 1. Formato dos dados medidos fornecido pelo sistema de aquisição de curvas  $I$ - $V$  utilizado no Labsol.

| Medida | Tensão(V) | Corrente(A) | Irradiância (W/m <sup>2</sup> ) | Temperatura inicial (°C) | Temperatura final (°C)   |
|--------|-----------|-------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1      | -4.5856   | 0.631140    | 742.54                          | 33.39                    | 33.41                    |
| 2      | -8.2367   | 0.618869    | 742.49                          | <b>Data</b>              | <b>Hora</b>              |
| 3      | -8.8966   | 0.619372    | 742.12                          | 07/05/2010               | 15:05:45                 |
| 4      | -8.9207   | 0.619606    | 741.9                           | <b>Nº de pontos</b>      | <b>Tempo/medida (ms)</b> |
| 5      | -8.8168   | 0.619372    | 742.06                          | 500                      | 100                      |

### 3. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA PÓS PROCESSAMENTO DE CURVAS $I$ - $V$

A linguagem escolhida para a elaboração do software desenvolvido foi o Visual Basic, versão 6.0. Esta linguagem foi escolhida por proporcionar uma interface amigável além de possuir uma série de ferramentas de controle de forma a facilitar a estruturação do programa e execução das diversas tarefas necessárias para o pós-processamento.

A Figura 2 apresenta a janela principal do programa onde podem ser verificadas as funções disponíveis.

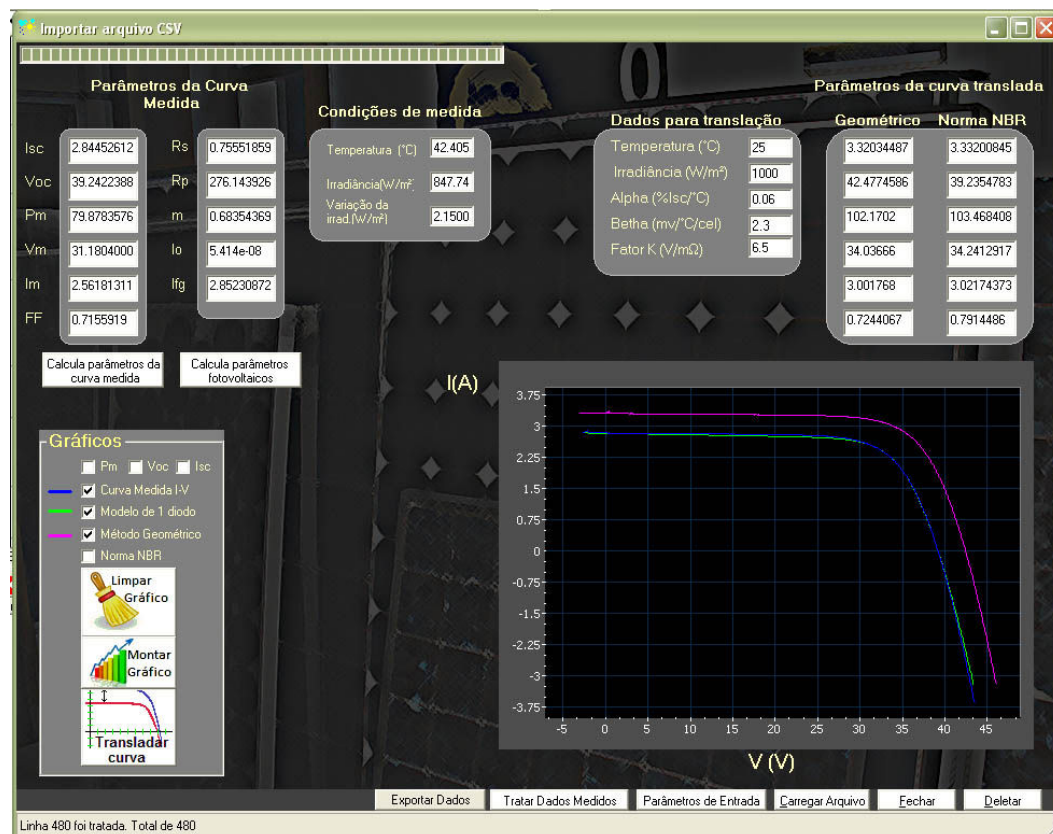


Figura 2 – Janela principal do software desenvolvido para pós-processamento de curvas  $I$ - $V$  de módulos fotovoltaicos.

Na Figura 2 pode-se observar um módulo gráfico onde é possível desenhar na tela a curva  $I$ - $V$  medida, a curva transladada (segundo dois métodos diferentes), a curva gerada matematicamente pelo modelo de 1 diodo e as regiões utilizadas para o cálculo dos parâmetros elétricos e fotovoltaicos da curva  $I$ - $V$  medida. A seguir é descrito como os

parâmetros elétricos da curva são calculados com elevado grau de precisão, em função das diferentes regiões de interesse da curva medida.

### 3.1 Parâmetros de entrada

Nesta etapa o usuário do software tem a possibilidade de modificar os dados necessários para as diversas etapas de cálculo. Para que um usuário sem muita experiência no assunto consiga operar o software sem grande dificuldade, todos esses dados já possuem valores iniciais padrões, de maneira que caso o usuário não faça nenhuma modificação, ainda assim o software é capaz de operar sem problemas. Os dados de entrada são os seguintes:

**Região para o cálculo de  $I_{SC}$  e de  $R_{p0}$  (inclinação da curva  $I-V$  nesta região, necessária para o cálculo de  $R_p$ ):**

A região para o cálculo desses parâmetros é escolhida em função de um valor de tensão ( $V_{OC*}$ ) que corresponde ao maior valor medido de tensão com corrente positiva (primeiro quadrante). Como valores iniciais padrão, selecionam-se pontos compreendidos em uma região entre -1%  $V_{OC*}$  e 20%  $V_{OC*}$ . Uma vez selecionados esses pontos é aplicada uma regressão linear por mínimos quadrados e são determinados os valores de  $I_{SC}$  e de  $R_{p0}$ .

**Região para o cálculo de  $V_{OC}$  e de  $R_{S0}$  (inclinação da curva  $I-V$  nesta região, necessária para o cálculo de  $R_s$ ):**

A região para o cálculo desses parâmetros é escolhida em função de  $I_{SC}$ , já calculado segundo os parâmetros escolhidos no item anterior. Como valores iniciais padrão, selecionam-se pontos compreendidos em uma região entre 20%  $I_{SC}$  e -5%  $I_{SC}$ . Uma vez selecionados esses pontos, é aplicada uma regressão linear por mínimos quadrados e são obtidos então os valores de  $V_{OC}$  e de  $R_{S0}$ . Caso a curva  $I-V$  não tenha sido medida com valores de corrente de até -5%  $I_{SC}$  o software seleciona automaticamente todos os pontos medidos com corrente inferior a 20%  $I_{SC}$ .

**Região para o cálculo de  $P_M$  e  $V_M$  (tensão correspondente à máxima potência do dispositivo):**

A região para o cálculo destes parâmetros é escolhida em função da tensão correspondente ao maior valor de potência medido ( $V_{M*}$ ). Os valores de potência são calculados multiplicando a tensão e a corrente medidas, originando desta forma, uma curva  $P-V$ . O padrão para os valores iniciais utilizados na determinação desses parâmetros corresponde a pontos compreendidos entre 0,75  $V_{M*}$  e 1,15  $V_{M*}$ . Em acordo com a norma americana E 1036-08 (ASTM, 2008) é então aplicada uma regressão polinomial de ordem 4 a partir da qual são obtidos os valores de  $V_M$  e  $I_M$ . O grau do polinômio pode ser alterado, sendo permitidos valores entre 2 e 6.

A Figura 3 apresenta a janela do software na qual o usuário pode selecionar as regiões para o cálculo dos principais parâmetros elétricos da curva medida. Além disso, caso tenha ocorrido algum problema na medida da temperatura, ou esta não conste no arquivo original que contém a curva  $I-V$ , o valor da temperatura pode ser inserido manualmente caso este seja conhecido. Nesta mesma janela deve ser inserido o número de células do dispositivo do qual a curva  $I-V$  foi medida.

A Figura 4 apresenta a) uma curva  $I-V$  medida um módulo de silício amorfo de tripla junção e três regiões desta mesma curva utilizadas para o cálculo de: b)  $I_{SC}$  e  $R_{p0}$ , c)  $V_{OC}$  e  $R_{S0}$  e d)  $P_M$ ,  $V_M$  e  $I_M$ . As três regiões da curva apresentadas na Figura 4 correspondem aos valores iniciais padrões presentes no software desenvolvido.

**PARÂMETROS DE ENTRADA**

| Intervalos para cálculo           |      |
|-----------------------------------|------|
| Intervalos para calcular $I_{sc}$ |      |
| Inicial (% $V_{oc}$ )             | 1    |
| Final (% $V_{oc}$ )               | 20   |
| Intervalos para calcular $V_{oc}$ |      |
| Inicial (% $I_{sc}$ )             | 20   |
| Final (% $I_{sc}$ )               | 5    |
| Intervalos para calcular $P_m$    |      |
| Inicial (% $V_m$ )                | 0.75 |
| Final (% $V_m$ )                  | 1.15 |

Nº de células do módulo: 72    Grau do polinômio de ajuste: 4    Entrar com a temperatura: Temp (°C)    Volta para a tela principal

Figura 3 – Janela de configuração do software para seleção das regiões utilizadas no cálculo dos principais parâmetros elétricos da curva  $I-V$ .

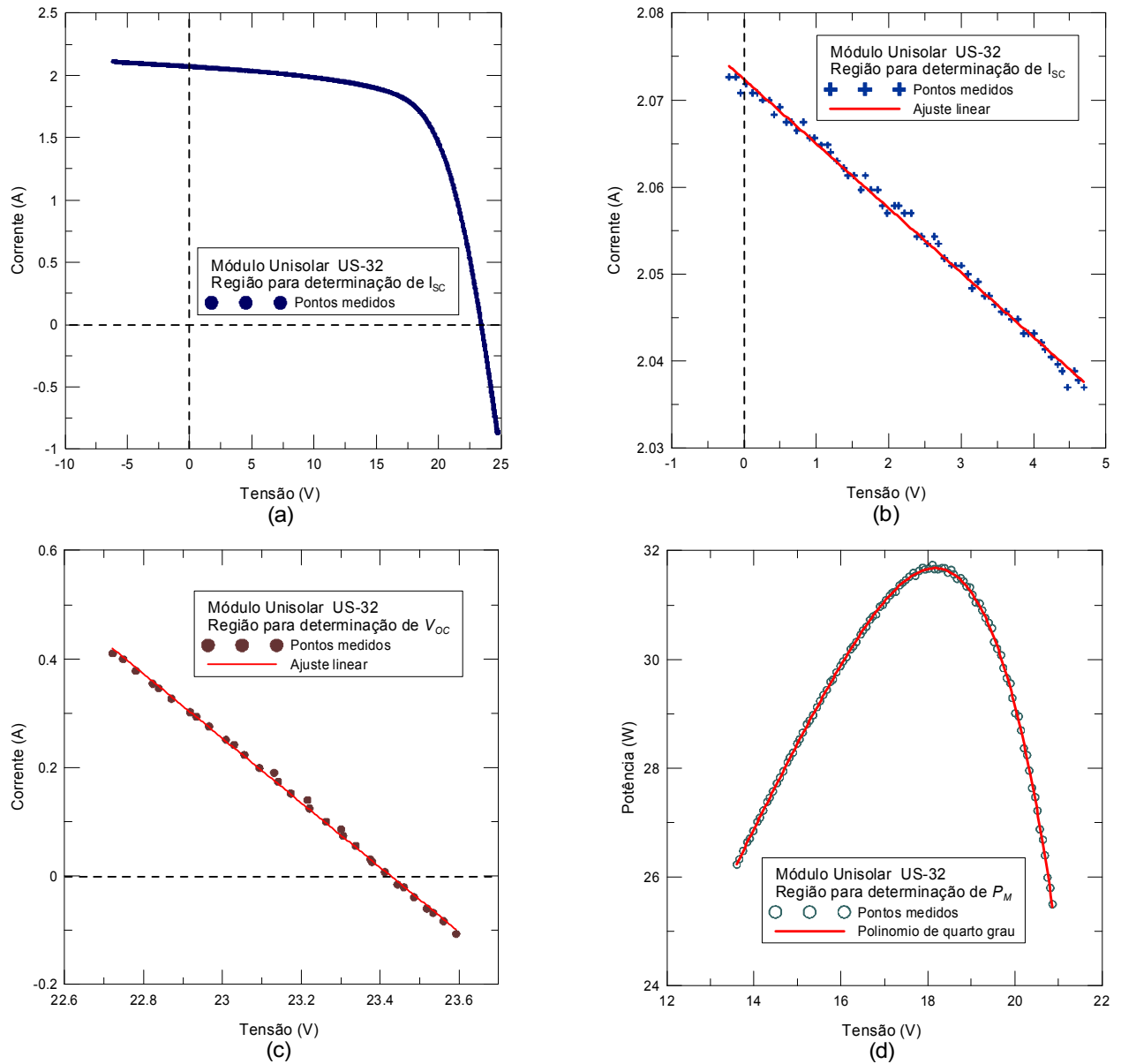


Figura 4 - a) Curva  $I$ - $V$  medida um módulo de silício amorfo de tripla junção e três regiões desta mesma curva utilizadas para o cálculo de: b)  $I_{SC}$  e  $R_{P0}$ , c)  $V_{OC}$  e  $R_{S0}$  e d)  $P_M$ ,  $V_M$  e  $I_M$ .

### 3.2 Determinação dos parâmetros fotovoltaicos

Através do software desenvolvido é também possível a extração de parâmetros matemáticos presentes na Equação (1), que relaciona matematicamente a tensão e a corrente de uma curva  $I$ - $V$  através do modelo de 1 diodo.

$$I = I_{SC} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V + IR_S}{V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (1)$$

O termo  $V_T$  presente na Equação é descrito na Equação (2), onde  $N_S$  representa o número de células associadas em série no módulo e  $N_J$  o número de junções de cada célula, uma vez que definido desta forma este método pode ser também aplicado a dispositivos de multijunções. Ainda na Equação (2)  $e$  é a carga do elétron,  $k_B$  é a constante de Boltzmann [ $1,381 \times 10^{-23}$  J/K] e  $T_C$  é a temperatura da célula.

$$V_T = \frac{N_J N_S m k_B T_C}{e} \quad (2)$$



Esses parâmetros fotovoltaicos são extraídos diretamente da curva medida por meio de um método proposto por Phang et al., (1984). Este método é brevemente descrito a seguir:

A partir dos dados de tensão e corrente de uma curva  $I$ - $V$  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. Considerando que a inclinação da curva  $V$ - $I$  junto à região de curto-circuito ( $R_{P0}$ ) é predominantemente influenciada pela resistência paralela, esta é aproximada por  $R_{P0}$ , mas com sinal trocado. A inclinação da curva  $V$ - $I$  junto à região de circuito aberto também é determinada ( $R_{S0}$ ), o que corresponde à derivada da tensão em função da corrente aplicada no ponto onde a corrente é nula.

Uma vez que  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $V_M$ ,  $I_M$ ,  $R_{P0}$  e  $R_{S0}$  tenham sido determinados, a partir da curva medida, com alto grau de precisão, os parâmetros fotovoltaicos podem ser calculados pelo método de Phang et al. a partir das Equações (3) a (7). Este método de extração de parâmetros fotovoltaicos foi escolhido por ser um método simples e que apresenta excelentes resultados, tanto para tecnologias baseadas em silício cristalino como para filmes finos diversos, tais quais silício amorfo e telureto de cádmio. A aplicação deste método em diversas curvas de módulos de diferentes tecnologias pode ser encontrada em Bühler (2011). A Figura 5 apresenta exemplos de aplicação do método de Phang *et al.* aplicado a curvas de um módulo de a) silício cristalino e b) silício amorfo de tripla junção.

$$R_P \cong -R_{P0} \quad (3)$$

$$m = \frac{V_M + I_M R_{S0} - V_{OC}}{V_T \left[ \ln \left( I_{SC} - \frac{V_M}{R_P} - I_M \right) - \ln \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_P} \right) + \frac{I_M R_P}{I_{SC} R_P - V_{OC}} \right]} \quad (4)$$

$$I_0 = \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_P} \right) \exp \left( \frac{-V_{OC}}{m V_T} \right) \quad (5)$$

$$R_S = \left( R_{S0} - \frac{m V_T}{I_0} \right) \exp \left( \frac{-V_{OC}}{m V_T} \right) \quad (6)$$

$$I_{fg} = I_{SC} \left( 1 + \frac{R_S}{R_P} \right) + I_0 \left( \exp \left( \frac{I_{SC} R_S}{m V_T} \right) - 1 \right) \quad (7)$$

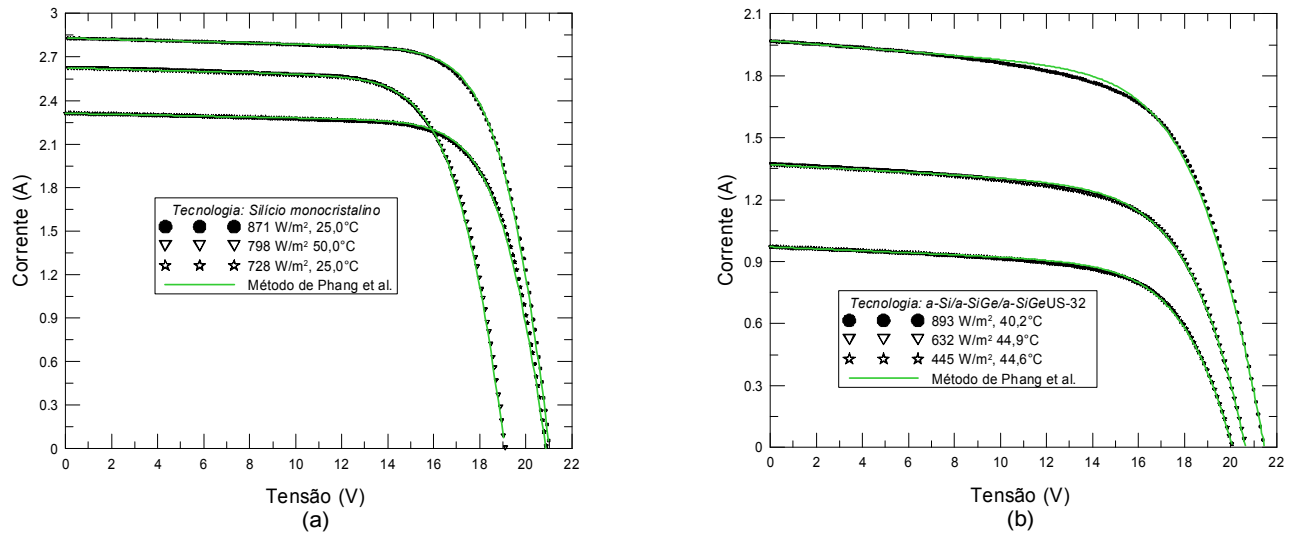


Figura 5 – Exemplos de aplicação do método de extração de parâmetros fotovoltaicos de Phang et al. em curvas de: a) módulo de silício cristalino e b) módulo de silício amorfo de tripla junção.

### 3.3 Translação da curva $I$ - $V$ para a condição padrão ou outra qualquer

Uma função bastante importante que se encontra disponível no software é a translação da curva  $I$ - $V$  medida para uma condição de irradiância e temperatura qualquer. Se encontram disponíveis dois métodos de translação, o método da norma internacional (IEC, 1987) e um método de translação geométrico descrito em Bühler e Krenzinger (2008).

De forma geral, pode-se afirmar que o método da norma internacional apresenta melhores resultados e pode ser aplicado em uma faixa de irradiância e temperatura maior do que o método geométrico de forma que o resultado final

ainda apresente elevado grau de qualidade. Por outro lado, dentro de uma determinada faixa de aplicação, apresentada na Tabela 2 o método geométrico também apresenta resultados muito bons para a translação e possui a vantagem de não necessitar coeficientes, como  $R_s$  ou o fator de correção da curva ( $K$ ), necessários no método da norma internacional. A Tabela 2 apresenta uma relação dos intervalos de irradiância e temperatura para os quais cada método pode ser aplicado de forma que o resultado apresente bom nível de qualidade. Ressalta-se que a Tabela 2 fornece valores de referência que foram obtidos de um estudo aprofundado realizado em Bühler, 2011, mas matematicamente os métodos de translação podem ser aplicados para qualquer valor de irradiância superior a 10 W/m<sup>2</sup> e inferior a 1200 W/m<sup>2</sup>.

Tabela 2. Limites de diferença de temperatura e irradiância entre a condição de medida e de translação para a aplicação dos métodos de translação sugeridos.

| Método de translação            | Intervalo de irradiância | Intervalo de temperatura |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>Silício cristalino e CIS</i> |                          |                          |
| NBR/IEC                         | 30%                      | 30°C                     |
| Geométrico                      | 30%                      | 20°C                     |
| <i>Silício amorfo e CdTe</i>    |                          |                          |
| NBR/IEC                         | 30%                      | 20°C                     |
| Geométrico                      | 20%                      | 10°C                     |

A Figura 6 apresenta uma curva medida na condição de 753 W/m<sup>2</sup> e 45,7 °C de um módulo de silício monocristalino e a curva transladada para a condição padrão por meio dos dois métodos de translação.

Para que o processo de translação seja realizado corretamente é importante que, caso a curva medida apresente influência de diodos de *bypass* (influência caracterizada por um aumento exponencial de corrente no primeiro quadrante), estes não interfiram nos procedimentos de cálculo que o software realiza. Desta forma foi também implementada uma ferramenta que é capaz de verificar matematicamente se a curva medida possui pontos com influência de diodos de *bypass* e em caso positivo, eliminar esses pontos. Esta tarefa é muito importante, pois diodos de *bypass* podem conduzir a valores de  $I_{SC}$  calculados completamente equivocados.

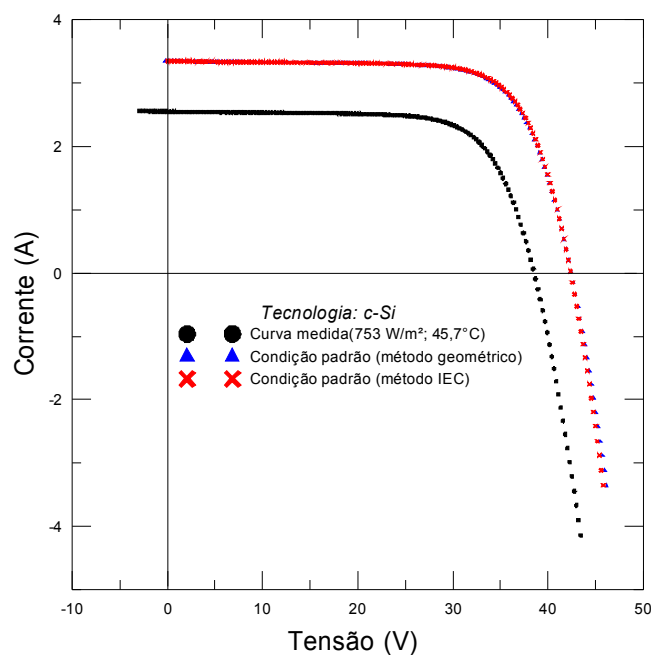


Figura 6 – Exemplo de curva medida de um módulo de silício monocristalino e curva transladada para a condição padrão por meio dos dois métodos de translação utilizados no software, Método da norma IEC método geométrico.

### 3.4 Extrapolação da curva $I$ - $V$ medida para se adequar ao processo de translação

Tanto o método de translação geométrico quanto o método proposto pela norma IEC fazem com que a curva seja deslocada no sistema de coordenadas, para cima ou para baixo e para a esquerda ou para a direita, dependendo das condições estabelecidas para a translação. Dessa forma, é comum que ao se transladar uma curva  $I$ - $V$  não existam pontos suficientes para preencher esta curva totalmente no primeiro quadrante.

Tomando como exemplo uma curva medida cujo menor valor de tensão seja de -1 V, se esta curva for transladada para uma condição onde todos os pontos de tensão sofrem um deslocamento de 5V para a direita, fica evidente que a curva transladada não irá cruzar o eixo da corrente. Um raciocínio semelhante, mas pensando em um deslocamento de corrente, pode também ser aplicado para o caso em que a curva transladada acaba terminando antes de cruzar o eixo da

tensão. Para corrigir esses possíveis problemas foi implementado no software uma ferramenta que extrapola os dados de tensão e corrente de forma que a curva transladada sempre cruze os eixos de tensão e de corrente.

A extrapolação da curva medida, de forma que, independente da condição de translação a curva transladada preencha todo o primeiro quadrante é realizada aplicando a equação (1), uma vez que os parâmetros fotovoltaicos já tenham sido extraídos pelo método de Phang et al. Esta equação é aplicada para extrapolar a curva  $I-V$  tanto na região de curto-circuito, quanto na região de circuito aberto.

A Figura 7a apresenta um exemplo de curva medida onde a translação faz com que essa curva não preencha totalmente o primeiro quadrante. A Figura 7b apresenta essa mesma curva com pontos  $I-V$  extrapolados pela aplicação da Equação (1) de forma que a curva transladada, para a mesma condição da Figura 7a, preencha totalmente o primeiro quadrante. Como pode ser observado pela Figura 7b a técnica adotada para a extrapolação da curva fornece um resultado bastante condizente com a curva medida. Esta extrapolação pode ser aplicada para intervalos maiores do que são apresentados na Figura 7b, uma vez que o método de Phang et al. é bastante confiável na representação da curva de um dispositivo fotovoltaico nas regiões do circuito aberto e do curto-circuito.

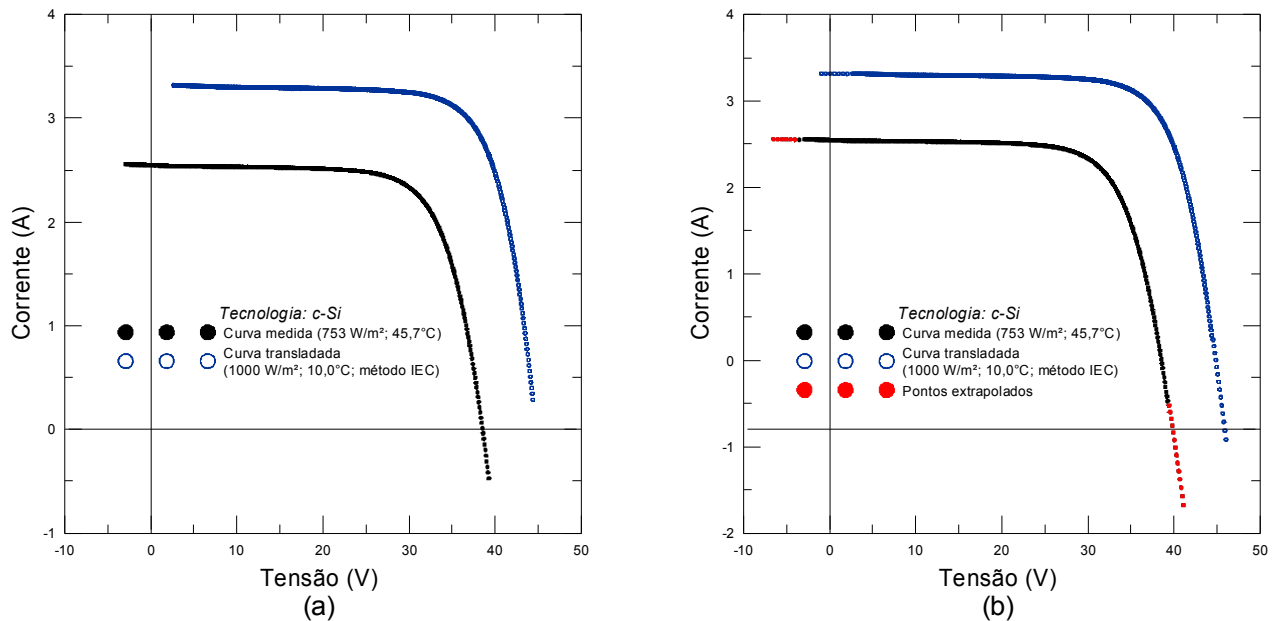


Figura 7 – Curva  $I-V$  medida e curva transladada: a) com pontos insuficientes na curva medida para que a curva transladada preencha totalmente o primeiro quadrante, b) com pontos  $I-V$  extrapolados de forma que a curva transladada preencha totalmente o primeiro quadrante.

#### 4. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um software para pós-processamento de curvas  $I-V$  de dispositivos fotovoltaicos. Este software contempla a determinação dos parâmetros elétricos da curva com um excelente grau de precisão, a partir da análise de regiões específicas da curva  $I-V$ . O software permite também a translação da curva para diferentes condições de temperatura e irradiância segundo um método de translação geométrico e o método da norma brasileira, que é baseado na norma IEC. Este software tem sido utilizado junto ao Labsol proporcionando uma análise rápida e confiável de curvas características medidas de dispositivos fotovoltaicos de diversas tecnologias.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o uso das instalações e equipamentos do Centro de Investigaciones, Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASTM, 2008. American Society for Testing and Materials. ASTM E 1036-08. Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.
- Bühler, A. J., 2011. Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Pós-Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos, Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- 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 Latino Americana de la ISES, 2008, Florianópolis. Anais do II CBENS & III ISES-CLA. Recife: ABENS.



- 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.
- Chan, D. S. H. e Phang, J. C. H., 1987. Analytical Methods for the Extraction of Solar-Cell Single and Double Diode Model Parameters from  $I$ - $V$  Characteristics, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 34, n. 2, pp 286-293.
- Gasparin, F. P., (2009). Desenvolvimento de um traçador de curvas características de Módulos Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- EPIA, European Photovoltaic Industry Association, 2010b. Annual Report 2009, disponível no endereço eletrônico <http://www.epia.org/publications/epia-publications.html>, capturado em 25 de outubro de 2010.
- IEC, 1987. International Electrotechnical Commission. IEC-891 - Procedures irradiance correction to measured  $I$ - $V$  characteristics of crystalline silicon devices for temperature and irradiance.

## DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR POST-PROCESSING OF $I$ - $V$ CURVES OF PHOTOVOLTAIC DEVICES

**Abstract.** *The photovoltaic has been growing recently, especially in Europe, but also in countries like USA, Japan and China. In South America, the photovoltaic scenario is still far from the European's scenario however, considering the high solar potential available in this continent and the consolidation this energy source has taken in the last years, its future is very promising. In this scenario and considering any prediction for the future in the world, it is clear that the characterization of photovoltaic modules efficiently and reliably is fundamental for the establishment of new PV installations and evaluation of the already existent ones. To analyse the electrical performance of a photovoltaic module is essential the determination of the current versus voltage curve ( $I$ - $V$ ) known as characteristic curve. From the analysis of this curve it is possible to obtain important information about several parameters of the PV generator such as the short-circuit current ( $I_{SC}$ ), open-circuit voltage ( $V_{OC}$ ) and maximum power point ( $P_M$ ). In order to obtain these and other parameters with a high level of quality it is necessary the application of a post-processing method in the measurement raw data. This procedure usually requires a considerable time and a good level of knowledge in the issue. This paper presents a post-processing software developed by the researches of the Laboratório de Energia Solar (Labsol) of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) for  $I$ - $V$  curves of photovoltaic devices. The determination of various electrical and photovoltaic parameters from an  $I$ - $V$  curve, as well as the translation of this curve for any irradiance and temperature condition are included among the features of the software.*

**Key words:** Photovoltaic modules,  $I$ - $V$  Curve, Characterization of photovoltaic devices, Post-processing software