

ESTUDO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM A TEMPERATURA A PARTIR DE ENSAIOS NO ESCURO

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)-3316-6841 e-mail: ajbuhler@gmail.com

RESUMO: Para a caracterização de módulos fotovoltaicos é necessária a determinação de uma curva de corrente por tensão ($I-V$) denominada curva característica. Considerando que a curva $I-V$ é dependente da irradiância e da temperatura são necessárias equações de correção para que se possa transladar uma curva medida em determinadas condições para outras quaisquer. Para esta translação é necessária a determinação do coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura (β). Para obter este coeficiente normalmente são necessários muitos ensaios com o módulo fotovoltaico exposto à iluminação natural, o que torna este procedimento extremamente dependente das condições climáticas. Este trabalho apresenta um breve estudo sobre a possibilidade da determinação do coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura a partir de ensaios no escuro. Os resultados obtidos para β através dos ensaios no escuro são comparados com resultados obtidos a partir de ensaios convencionais.

Palavras chave: Módulos fotovoltaicos, parâmetros fotovoltaicos, curva característica.

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 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 NBR – 12136 (ABNT, 1991a), 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 $T = 25^\circ\text{C}$). Fora da condição padrão, que muitas vezes é difícil de ser obtida, a curva precisa ser corrigida e aí se faz necessário o conhecimento dos coeficientes térmicos (α) e (β) que correspondem respectivamente à variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto com a temperatura.

A determinação destes coeficientes térmicos muitas vezes exige inúmeros ensaios com iluminação natural em diferentes temperaturas, mas mesma irradiância. Obter um conjunto de curvas sem que a irradiância varie significativamente muitas vezes é uma tarefa difícil de ser realizada. No entanto é possível verificar que algumas características de uma célula e por consequência de um módulo fotovoltaico é muito similar em condições de ausência de iluminação do que em condições de iluminação natural. Dessa forma, ensaios no escuro passam a ser uma interessante alternativa para a determinação de diversos parâmetros fotovoltaicos [Kaminski, 1997]. No que diz respeito à variação da tensão com a temperatura, é possível verificar que tanto o módulo iluminado quanto o módulo no escuro (com corrente injetada) apresentam um comportamento muito parecido.

Medidas no escuro de curvas ($I-V$) em módulos fotovoltaicos tem sido utilizadas para a determinação de diversos parâmetros necessários para a caracterização elétrica dos mesmos, tal como é apresentado por Bühler e Krenzinger (2006), Hussein *et al.* (2001) e King *et al.* (1997). No entanto é importante ressaltar que as medidas no escuro não fornecem nenhuma informação sobre a corrente de curto-circuito uma vez que ela é dependente da iluminação variando linearmente com a mesma.

Embora muitos pesquisadores defendam o uso de simuladores solares como uma alternativa para diminuir a dependência das condições climáticas nos ensaios de desempenho elétrico dos módulos, existem algumas questões importantes a levar em conta. Tais simuladores apresentam um custo consideravelmente elevado e apresentam sérias limitações quando comparados com a luz solar. Por melhor que seja o simulador solar persiste a questão do espectro não ser igual ao da luz solar, além da questão da uniformidade da iluminação, tais fatores podem ser determinantes para que uma curva $I-V$ determinada sob iluminação artificial não seja a mesma do que aquela determinada sob iluminação natural [Vera *et al.*, 2006].

O presente trabalho destina-se à análise da determinação da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura a partir de ensaios com módulos fotovoltaicos no escuro. É proposto um método para a determinação deste coeficiente e os resultados obtidos são comparados com ensaios convencionais

CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA CÉLULA OU MÓDULO FOTOVOLTAICO

O modelo adotado neste trabalho para a representação de uma célula fotovoltaica foi o modelo de 1 diodo. O circuito elétrico equivalente de acordo com este modelo é apresentado na figura 1 e a equação (1) é a resultante da análise deste circuito.

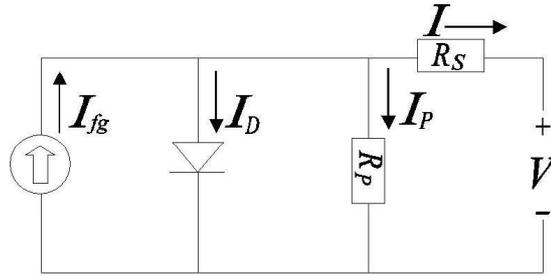


Figura 1: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

Na figura 1, I_{fg} é a corrente elétrica gerada a partir da iluminação da célula, I_D é a corrente elétrica do diodo e I_P é a corrente que circula pela resistência paralela. Quando a célula está em curto-circuito, as correntes do diodo e da resistência paralela praticamente se anulam, dessa forma, assume-se que a corrente fotogerada é igual à corrente de curto-circuito, I_{SC} .

$$I = I_{SC} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{e(V + IR_S)}{mk_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (1)$$

onde I_o é a corrente de saturação reversa do diodo, e é a carga do elétron, m é o fator de idealidade do diodo, k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura, V é a tensão, R_S é a resistência série e R_P a resistência paralela.

No caso dos módulos fotovoltaicos, considerando pequenas alterações, tanto o circuito equivalente quanto a equação descrita acima são válidos, uma vez que os módulos são associações de células. Tais associações, na grande maioria dos módulos usados em aplicações fotovoltaicas, são feitas de maneira a ligar os terminais das células em série o que faz a tensão do módulo ser um somatório das tensões de cada célula. Em se tratando de módulos compostos por células associadas em série o produto $mK_B T$ passa a ser multiplicado por N_S onde N_S corresponde ao número de células. Os valores de R_S e R_P representam as resistências série e paralela do módulo completo diferindo dos valores para uma única célula.

A curva característica de uma célula fotovoltaica consiste na representação matemática da relação entre corrente e tensão em um sistema de coordenadas ortogonal. Para módulos a principal diferença em relação à curva de uma célula é que a tensão de circuito aberto é multiplicada pelo número de células associadas em série. A figura 2 apresenta uma curva $I-V$ medida sob iluminação natural de um módulo de silício monocristalino de 72 células bem como a curva de potência *versus* tensão ($P-V$) para este mesmo módulo. Os valores de potência são obtidos simplesmente multiplicando a corrente pela tensão ponto a ponto.

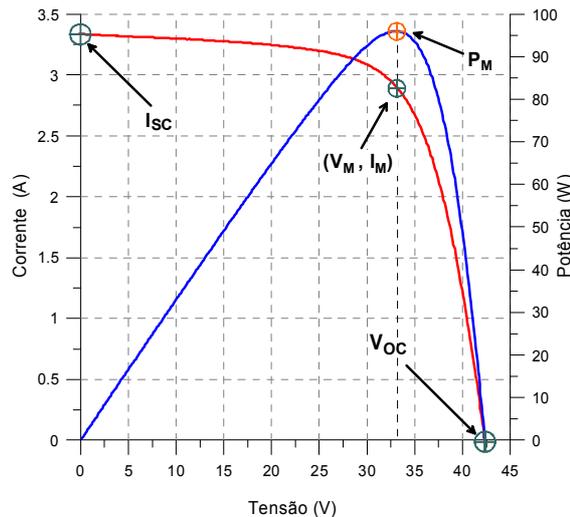


Figura 2: Curva característica $I-V$ e curva de potência *versus* tensão ($P-V$) de um módulo de silício monocristalino de 72 células (100 W / 24 V nominal).

DEPENDÊNCIA DAS CURVAS I - V E P - V COM A TEMPERATURA

A temperatura é um fator de importante influência na curva característica de um dispositivo fotovoltaico. A corrente elétrica de curto-circuito aumenta ligeiramente com a temperatura segundo um coeficiente (α) que apresenta valores típicos para células de silício cristalino de $0,06\%^\circ\text{C}^{-1}$ ou $0,03 \text{ mA}^\circ\text{C}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. O coeficiente da variação da corrente de curto-circuito com a temperatura é definido pela equação (2). Este aumento de corrente é devido a uma diminuição do *gap* do material constituinte da célula o que faz com que mais fótons incidentes tenham energia suficiente para produzir pares elétron-lacuna [Green, 2007].

$$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \quad (2)$$

A tensão, por sua vez, apresenta uma variação linear com a temperatura. Tipicamente, para módulos de silício monocristalino, a tensão decai de acordo com um coeficiente (β) que apresenta valores da ordem de $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ por célula [Lasnier, 1990]. O coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura é definido a seguir:

considerando a equação (1) e aplicando a condição de $V = V_{OC}$ e $I = 0$ têm-se:

$$V_{OC} = \frac{N_S m k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + \frac{V_{OC}}{R_p I_0} + 1 \right) \cong \frac{N_S m k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad (3)$$

Derivando com respeito à temperatura têm-se a equação (4):

$$\frac{\partial V_{OC}}{\partial T} = \frac{N_S m k_B}{e} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} \right) + \frac{N_S m k_B T}{e} \left(\frac{1}{I_{SC}} \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} - \frac{1}{I_0} \frac{\partial I_0}{\partial T} \right) = \beta \quad (4)$$

Como se pode observar na equação (4) a diminuição da tensão de circuito aberto é devida a uma variação com a temperatura da corrente de saturação reversa e da corrente de curto-circuito. Entretanto o coeficiente β pode ser atribuído principalmente ao incremento exponencial da corrente de saturação reversa. Essa corrente é fruto dos portadores de carga minoritários criados por excitação térmica. A equação (5) apresenta a relação matemática entre a corrente de saturação reversa e a temperatura.

$$I_0(T) = AT^3 \exp \left(\frac{-E_g(T)}{k_B T} \right) \quad (5)$$

onde A é uma constante e E_G é a energia do *gap* do material, ou seja, a diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução.

A figura 3a apresenta curvas I - V e a figura 3b apresenta curvas P - V para um módulo de 72 células (m-Si) relativas à mesma irradiância mas em diferentes temperaturas.

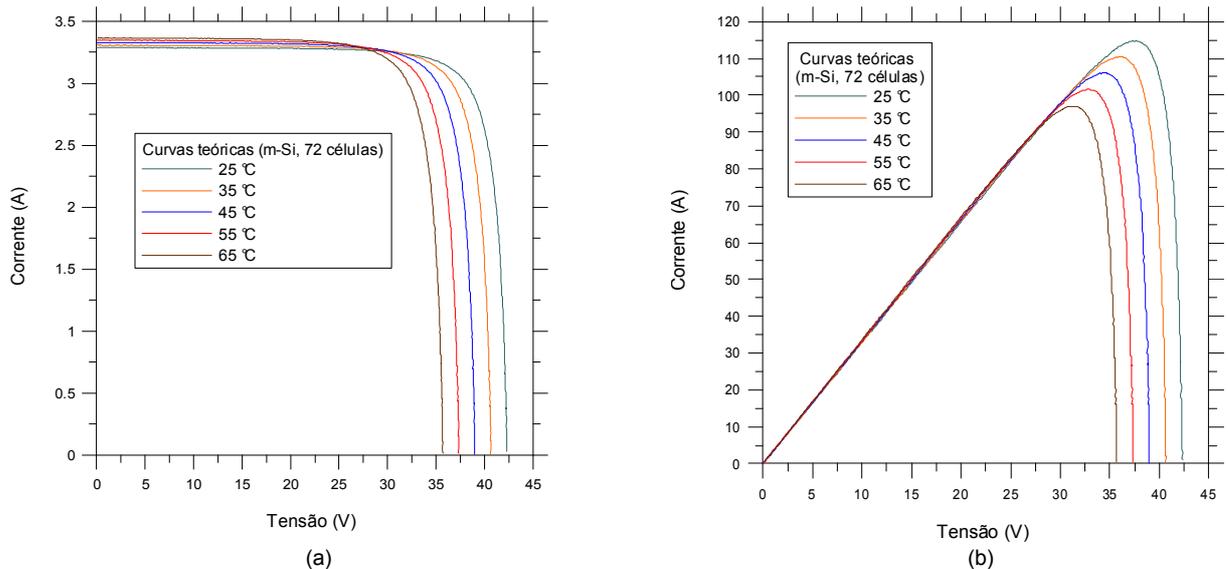


Figura 3: Curvas I - V (a) e curvas P - V (b) de um módulo de silício monocristalino de 72 células relativas a uma irradiância de 1000 W/m^2 e a diferentes temperaturas.

TRANSLAÇÃO DAS CURVAS DAS CURVAS $I-V$

Segundo a Norma Técnica, NBR – 12302 (ABNT, 1991b) quando o ensaio ocorre em condição diferente da padrão e se deseja corrigir a curva $I-V$ para esta condição são necessárias as equações (6) e (7):

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left(\frac{I_{CR}}{I_{MR}} - 1 \right) + \alpha(T_2 - T_1) \quad (6)$$

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1) \quad (7)$$

onde I_1 e V_1 são as coordenadas dos pontos na curva característica medida, I_2 e V_2 as coordenadas dos pontos correspondentes na curva corrigida, I_{CR} a corrente de curto-circuito na célula de referência sob radiação padrão ou outra qualquer, I_{MR} a corrente de curto-circuito medida na célula de referência, I_{SC} a corrente de curto-circuito medida no dispositivo em teste, T_1 a temperatura do dispositivo em teste, T_2 a temperatura padrão ou outra desejada, α é a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura do dispositivo em ensaio, β a variação da tensão de circuito aberto pela temperatura e K é o fator de correção da curva.

É importante ressaltar que além de β ser um coeficiente necessário para a correção de curvas $I-V$, ele também está diretamente ligado com a perda de potência de um módulo com o aumento da temperatura. Assim este coeficiente constitui uma importante informação sobre o desempenho do módulo em condições reais de operação

O fator de correção da curva K também requer um procedimento para sua medição, no entanto isto não será apresentado aqui uma vez que não é objeto de interesse deste trabalho.

ENSAIOS SEM ILUMINAÇÃO

De maneira simples, um módulo fotovoltaico pode ser considerado como um conjunto de células agrupadas em série e/ou em paralelo encapsuladas sob um vidro. As células fotovoltaicas são, em essência, diodos de junção PN de grande área. Tanto um diodo quanto uma célula, e conseqüentemente um módulo, apresentam uma variação da tensão com a temperatura.

Como apresentado por Bühler e Krenzinger (2006), as curvas de um módulo fotovoltaico determinadas sem iluminação guardam muitas informações a respeito do comportamento elétrico do mesmo. Sendo assim, da mesma forma que a tensão de circuito aberto do módulo iluminado varia com a temperatura segundo um coeficiente denominado β , as curvas do módulo no escuro também apresentam uma variação com a temperatura. Este fator de diminuição da tensão, como já explicado, é fruto predominantemente da variação da corrente de saturação reversa. Como esta corrente não depende da iluminação, a variação da tensão com a temperatura no escuro deve apresentar um comportamento similar do que no caso de uma célula ou módulo expostos à luz. Dessa forma, pode considerar ser possível a determinação de β no escuro.

A figura 4 apresenta curvas de um módulo fotovoltaico de 33 células de silício monocristalino determinadas sem iluminação e a diferentes temperaturas.

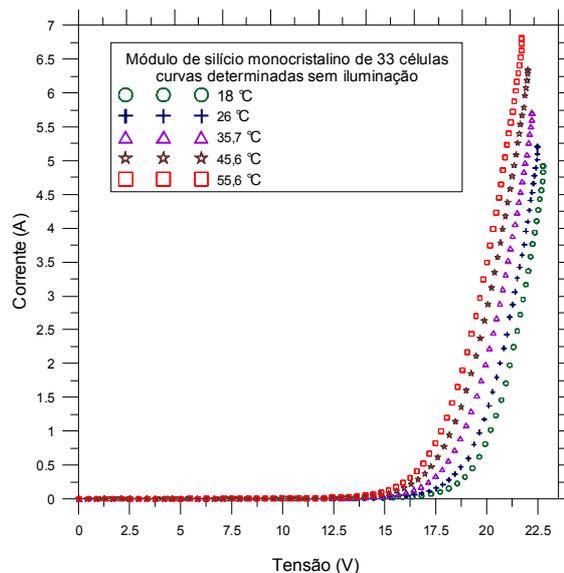


Figura 4: Curvas $I-V$ de um módulo de silício monocristalino de 33 células determinadas sem iluminação e em diferentes temperaturas.

Como apresentadas na figura 5, as curvas de um módulo no escuro são similares àquelas sob iluminação, mas com um deslocamento no eixo das ordenadas correspondente à corrente de curto-circuito do mesmo e uma diferença na tensão devido à resistência série (Bühler *et al.*, 2007). Dessa forma, o valor de tensão medido com o módulo no escuro (V_E), que representa a tensão de circuito aberto sob iluminação é aquele correspondente à corrente de curto-circuito. Vale ressaltar que a tensão de circuito aberto é assim chamada porque é o valor de tensão para o qual não há corrente elétrica resultante circulando no dispositivo fotovoltaico. Quando uma curva $I-V$ é determinada sem iluminação, o valor da tensão correspondente a V_{OC} não pode ser chamada de circuito aberto uma vez que existe corrente resultante circulando pelo módulo. Embora V_{OC} não seja igual à tensão correspondente no escuro, a variação de ambas as tensões com a temperatura deve, a princípio, ser a mesma.

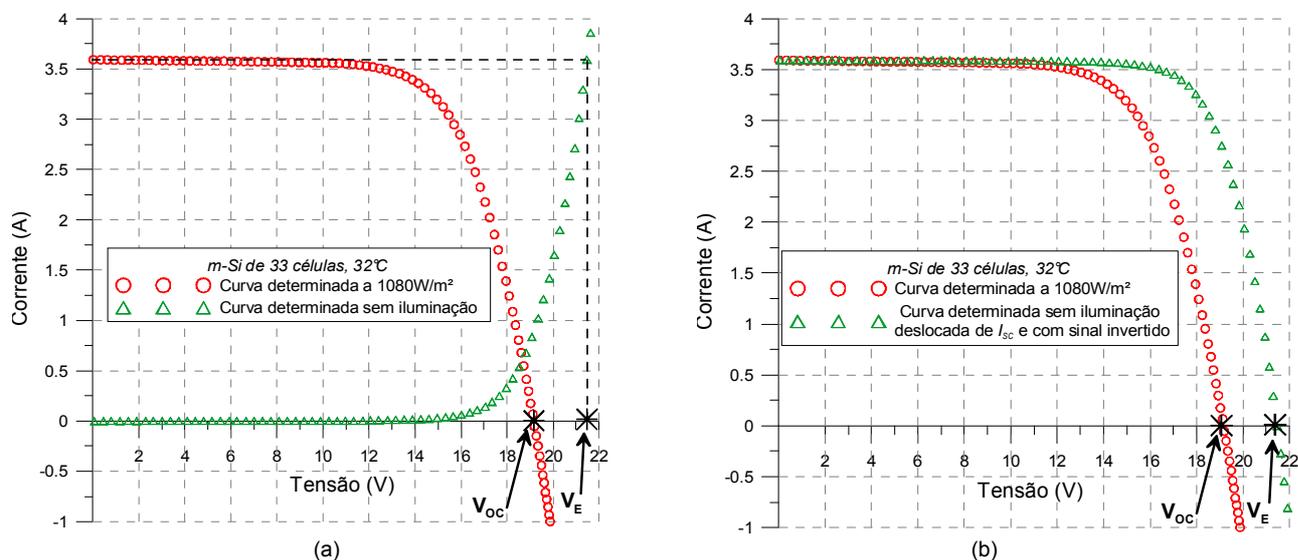


Figura 5: Curvas $I-V$ de um módulo de silício monocristalino de 33 células determinadas a 32 °C com e sem iluminação (a) e comparação entre curva no escuro com sinal trocado e deslocada de I_{SC} com curva medida sob iluminação natural (b).

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Em todos os ensaios para a determinação de curvas $I-V$ sob iluminação natural as medidas foram realizadas observando uma variação máxima aceitável de 2% da irradiância ao longo da medida. A célula de referência é fixada junto ao módulo, coplanar ao mesmo com um erro inferior a 2°. Durante todos os ensaios os módulos são colocados em um lugar amplo, longe de obstáculos e aproximadamente a 1 metro do solo.

As medidas no escuro são obtidas com o módulo coberto por um material opaco e realizadas no interior de um ambiente construído. A condição de ausência de iluminação do módulo é assumida uma vez que a tensão de circuito aberto deste seja nula.

Para os ensaios feitos com o módulo iluminado, a radiação solar é usada tanto para a polarização do módulo quanto para seu aquecimento. Já para o aquecimento do módulo nos ensaios no escuro, faz-se circular pelo mesmo uma corrente elétrica da ordem de 2 A a fim de se obter um regime de aquecimento lento, o que diminui a diferença entre o valor medido pelo sensor e a temperatura real das células. Para a medição da temperatura dos módulos, tanto nos ensaios no escuro quanto nos ensaios sob irradiância solar, foi fixado um sensor PT100 (classe A) na face posterior, junto ao Tedlar, em uma célula central, cuja temperatura é assumida como a média da temperatura do módulo.

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 μV (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 num tempo total inferior a 2 segundos. Uma descrição mais completa da técnica de aquisição de dados utilizada pode ser encontrada em Prieb (2002).

A incerteza associada a determinação da tensão de circuito aberto, é de 0,09V. Para o cálculo da incerteza de V_{OC} foram levados em consideração incertezas associadas a instrumentação e as condições de medida (temperatura e irradiância). A incerteza associada à irradiância é de 30W/m². Por fim, a incerteza na determinação de β calculada foi de 0,12 mV / °C por célula com uma incerteza de 0,22 °C para a temperatura.

A determinação da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura segundo o método proposto neste trabalho segue as seguintes etapas:

- a) Anexar um sensor para medição da temperatura junto ao dispositivo em ensaio.
- b) Determinar uma curva $I-V$ sob iluminação natural na menor temperatura prevista para o ensaio e medir V_{OC} e I_{SC} .
- c) Colocar o módulo no interior de um ambiente construído e isolar termicamente o dispositivo em ensaio.
- d) Cobrir o módulo com um material opaco de maneira a garantir que nenhuma irradiância atinja a superfície do mesmo.
- e) Determinar uma curva $I-V$ uma vez que a temperatura do módulo apresente o mesmo valor daquela na qual foi determinada a curva sob iluminação natural.
- f) Medir a tensão correspondente à corrente igual a de curto-circuito (I_{SC}).
- g) Aumentar a temperatura do módulo através, por exemplo, da injeção de corrente elétrica (efeito Joule), de modo que seja possível determinar diversas curvas $I-V$ para diferentes temperaturas.
- h) Em cada curva correspondente a uma dada temperatura, medir a tensão relativa a $I_{SC} + \alpha \Delta T$ onde α pode ser estimado como um valor típico para a tecnologia do dispositivo em ensaio e ΔT representa a diferença entre a temperatura do dispositivo no primeiro ensaio e a temperatura do dispositivo no ensaio em questão.
- i) Plotar os pontos de tensão medidos *versus* a temperatura do módulo em cada ensaio e obter, por meio da inclinação da reta, o valor de β do dispositivo em teste.

RESULTADOS OBTIDOS

Foram usados para os ensaios módulos das marcas Isofotón modelo I-100 (100 W / 24 V), e Siemens modelos SP65 e SM50-H (65 W / 12 V e 50 W / 12 V). Para esses módulos foi medida a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura, com os mesmos expostos à luz solar e posteriormente sem iluminação. Durante os ensaios sob iluminação natural, a irradiância medida, foi sempre maior do que 900 W/m². A flutuação tolerada entre os valores de irradiância ao longo dos ensaios (exposição do módulo à irradiação solar com medição simultânea de da temperatura e da tensão de circuito aberto) foi da ordem de 30 W/m². Os valores medidos de tensão foram então posteriormente corrigidos para a condição padrão de 1000 W/m² a fim de eliminar a influência da variação da tensão devido à variação da irradiância. Para tal correção foi feito uso da equação (9).

$$V_{OC2} = V_{OC1} + \frac{N_s m k_B T}{e} \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \quad (9)$$

onde G_1 e V_{OC1} são respectivamente a irradiância e tensão de circuito aberto nas condições da medida e G_2 e V_{OC2} correspondem a irradiância e tensão de circuito aberto nas condições padrão ou outra qualquer.

Com os valores de tensão e temperatura foram então traçadas curvas (V_{OC} *versus* T) das quais a inclinação fornece o valor da variação da tensão para o módulo em teste. Para a análise dos resultados a variação da tensão com a temperatura de cada módulo testada foi dividida pelo número de células em série resultando assim no coeficiente β (mV/°C por célula).

Os ensaios sem iluminação para a determinação de β foram feitos segundo duas diferentes metodologias: uma delas consiste em determinar curvas $I-V$ a diferentes temperaturas e localizar em cada uma delas o valor de tensão correspondente a V_{OC} . Esse valor de tensão (V_E) é aquele associado à corrente elétrica igual à I_{SC} . A outra metodologia consiste em alimentar o módulo com uma corrente elétrica igual à I_{SC} monitorando simultaneamente a tensão e a temperatura. Nota-se que para ambas as metodologias se faz necessária a determinação de uma curva $I-V$ com o módulo iluminado para que se conheça o valor de I_{SC} . Os valores de β encontrados nos ensaios no escuro também foram corrigidos, uma vez que I_{SC} também varia com a temperatura. Como demonstrado por Bühler (2007), a diferença entre V_{OC} e V_E pode ser expressa pela equação (10)

$$V_{OC} = V_E - I_{SC} R_S \quad (10)$$

onde R_S é a resistência série do módulo, previamente determinada no ensaio sem iluminação.

Derivando a equação (10) com respeito à temperatura e considerando que a resistência série não varia com a mesma, obtém-se:

$$\frac{\partial V_{OC}}{\partial T} = \frac{\partial V_E}{\partial T} - \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} R_S \quad (11)$$

Considerando que o termo do lado esquerdo da Equação (11), bem como o primeiro termo do lado direito correspondem, respectivamente, aos valores de β determinados com e sem iluminação, obtém-se:

$$\beta = \beta_E - \alpha R_S \quad (12)$$

onde β corresponde ao coeficiente medido com o módulo iluminado e β_E com o módulo no escuro. Assim, como os valores de β e β_E são negativos, o valor em módulo de β é maior que o valor medido no escuro (β_E).

Durante as medidas no escuro, cada módulo foi termicamente isolado tanto no fundo como nas laterais e na parte superior. Para o aquecimento dos módulos além da técnica de fazer circular uma corrente elétrica através dos mesmos, também foi utilizado em alguns ensaios um outro procedimento. Este procedimento consiste em aquecer o módulo em teste até uma temperatura pré-fixada (a máxima temperatura para o ensaio) e posteriormente monitorar a temperatura e a tensão em intervalos regulares de tempo, durante o resfriamento do mesmo, até que a temperatura do módulo entre em equilíbrio com a temperatura ambiente. Esta técnica permitiu que fosse verificada a precisão das medidas de temperatura dos módulos em ensaio, uma vez que comparando ensaios com regimes de aquecimento e resfriamento a diferença encontrada para os valores de β foi da ordem de 2%.

A tabela 1 apresenta os valores de β encontrados para os módulos testados sob iluminação natural e no escuro, já com a correção apresentada na Equação (12). Os valores medidos foram normalizados dividindo o resultado pelo número de células em série no módulo. A variação da irradiância ao longo dos ensaios sob iluminação natural também é apresentada na tabela 1. É possível observar que a pequena variação da irradiância ao longo dos ensaios sob iluminação natural pouco afeta a variação de V_{OC} se comparado com a influência da temperatura (a variação de V_{OC} com respeito à irradiância é logarítmica).

A figura 6 apresenta um gráfico da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura para um dos módulos medidos nos ensaios com e sem iluminação bem como a variação da irradiância ao longo do ensaio com o módulo iluminado.

Modelo	N_S	$R_S(\Omega)$	$B_{Sol} (mV/^\circ C)$	$B_{esc} (mV/^\circ C)$	Irradiância média (W/m^2)	Variação da irradiância (W/m^2)
SP65	36	0,612	-2,27	-1,98	960	2,5%
SM50-H	33	0,666	-2,28	-1,80	1080	1,1%
I-100	72	0,950	-1,97	-1,87	940	1,7%
I-100	72	1,166	-2,06	-1,92	910	2,1%

Tabela 1 - Valores de β medidos através de ensaios com e sem iluminação, normalizados para uma célula.

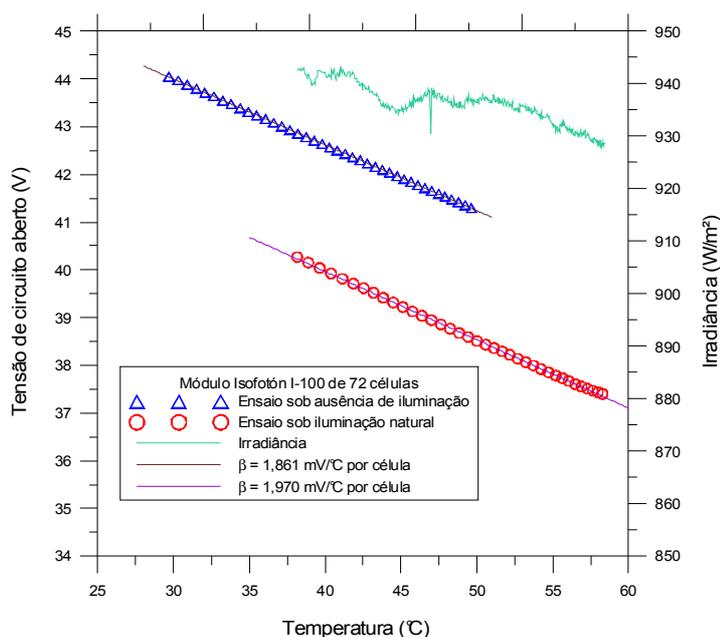


Figura 6 - Variação de V_{OC} com a temperatura (ensaio com e sem iluminação) e variação da irradiância ao longo do ensaio com o módulo iluminado.

Os valores de β encontrados para as medições sob iluminação natural foram da ordem de 2 mV/°C por célula com uma máxima diferença de 13% entre os mesmos. A diferença percentual entre os valores encontrados para β nos ensaios convencionais e no escuro apresentou variações entre os módulos testados. Em média essa diferença foi da ordem de 10%.

CONCLUSÕES

Foi apresentado um método para a determinação da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura a partir de ensaios sem iluminação. Os resultados obtidos através de ensaios com o módulo no escuro mostraram que é possível a determinação de β desta forma. Os valores de β obtidos a partir dos ensaios no escuro foram sempre menores do que nos ensaios com luz (em média 10%). Quando não houver necessidade de muita precisão, o método aqui apresentado para a determinação de β torna possível a comparação de diferentes módulos em diferentes condições de temperatura sem a necessidade de inúmeros ensaios sob iluminação natural.

Pretende-se ampliar este estudo com módulos de diferentes tecnologias e diferentes configurações buscando verificar se esta diferença sistemática se mantém. De qualquer forma persiste a necessidade da elaboração de um método de correção mais preciso levando em conta os mecanismos físicos responsáveis pela diferença sistemática entre a variação da tensão de circuito aberto com o módulo iluminado e no escuro. Uma das prováveis causas dessa diferença é a possibilidade da corrente de saturação reversa não apresentar a mesma variação nos ensaios com e sem iluminação. Efeitos de recombinação, entre outros, que ocorrem com diferentes taxas de injeção de portadores de carga na junção P-N podem ser responsáveis por este fenômeno.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991a). NBR12136 Módulos fotovoltaicos – Determinação de características fotoelétricas, Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991b). NBR12302 Módulos fotovoltaicos – Correção das curvas características corrente *versus* tensão ($I \times V$), em função da temperatura e radiação, Rio de Janeiro.
- Bühler A. J. e Krenzinger, A. (2006). Análise de curvas características sem iluminação como ferramenta para determinação de parâmetros fotovoltaicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 10, pp. 17-24.
- Bühler A. J., Vera, L. H. e Krenzinger, A. (2007). Determinação de Coeficientes Fotovoltaicos sob Ausência de Iluminação. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Anais do Congresso I CBENS, Fortaleza.
- Bühler A. J. (2007). Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação. Dissertação de Mestrado. PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- Green, M. A., <http://www.udel.edu/igert/pvcdrom/index.html>, capturado em 18 de setembro de 2007.
- Hussein R., Borchert D., Grabosch G. and Fahrner W. R. (2001). Dark I–V–T measurements and characteristics of (n) a-Si/(p) c-Si heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 69, 2, 123-129.
- Kaminski A., Marchand J. J., Fave A. and Laugier A. (1997). New Method of Parameters Extraction from Dark I-V Curve. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29 – October 3, Anaheim, CA.
- King D.L., Hansen B. R., Kratochvil J. A. and Quintana M. A. (1997). Dark Current-Voltage Measurements on Photovoltaic Modules as a Diagnostic or Manufacturing Tool. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29 – October 3, Anaheim, CA.
- Lasnier, F. and Ang, T. G. (1990). *Photovoltaic Engineering Handbook*. Adam Hilger, New York. 568p
- Prieb, C. W. M. (2002). Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado. PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- Vera L. H., Andrade, A. C. e Krenzinger, A. (2006). Metodologia para Analisar a Uniformidade da Iluminação. Mercofrio 2006, Anais do Congresso Mercofrio 2006: ASBRAV, v. CD-ROM, Porto Alegre.

ABSTRACT

In order to characterize the photovoltaic modules it is necessary to determinate the characteristic ($I-V$ curve). Considering that the $I-V$ curve is a function of irradiance and temperature, it is necessary to use correction equations in order to shift it from measured conditions to any other. To correct the $I-V$ curve it is required the determination of the temperature coefficient of the open circuit voltage (β). The determination of this coefficient normally require many measurements with the module under sunlight and the procedure becomes strongly dependent of the weather. This work presents a brief study about the possibility of the determination of β from dark measurements. The obtained results from dark measurements are compared with results obtained from conventional methods.

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