

## METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO ESPECTRAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE MULTIJUNÇÃO

A. J. Bühler, A. Krenzinger e R. B. de Souza  
Laboratório de Energia Solar – PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Prédio 42.712 CEP: 91.509-900 Porto Alegre – RS Brasil  
Tel. 55 (51)-3308-6841 e-mail: ajbuhler@gmail.com

**RESUMO:** Dispositivos fotovoltaicos com mais de uma junção PN, conhecidos como multijunção, tem sido desenvolvidos e estudados nos últimos tempos principalmente com o objetivo de se obter uma faixa de resposta espectral mais ampla e, conseqüentemente aumentar a eficiência de conversão fotovoltaica. Por outro lado, células de multijunção apresentam características especiais que exigem métodos específicos para ensaios de caracterização elétrica, principalmente no que diz respeito à determinação do fator de correção espectral, que tem de ser feito para cada união da célula e, diferentemente de tecnologias como a do silício cristalino, não pode ser negligenciada em muitos casos. Este trabalho apresenta a metodologia empregada pelo Laboratório de Energia Solar (LES) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para ensaios de dispositivos de multijunção. Como exemplo, um grupo de 5 módulos *tandem* (duas junções) foram ensaiados e os resultados mostraram que, dependendo do dia em que foi medido podem ser necessárias correções de até 4%.

**Palavras chave:** Módulos fotovoltaicos, curva característica *I-V*, resposta espectral, células de multijunção, caracterização de módulos fotovoltaicos.

### INTRODUÇÃO

Módulos fotovoltaicos baseados em tecnologias com mais de uma junção PN tem sido estudados e aprimorados nos últimos anos. Estas tecnologias têm sido utilizadas principalmente em situações onde elevados valores de eficiência são desejados, como em aplicações espaciais, por exemplo. Se por um lado células de multijunção apresentam a vantagem de possuir uma resposta espectral mais larga, devido justamente a superposição das respostas espectrais de cada junção, por outro lado existem aspectos característicos que devem ser levados em conta quando se caracteriza eletricamente um dispositivo desta tecnologia. Um exemplo desses aspectos está ligado à tensão de ruptura de cada junção, que pode interferir na forma da curva final quando o espectro ao qual o dispositivo é exposto não é adequado para uma das junções, (King et al., 2000).

A determinação da curva característica de um módulo fotovoltaico pode ser realizada utilizando luz natural ou simulada. No caso de se utilizar luz natural é importante que o tempo de aquisição da curva seja pequeno a ponto de que a irradiância não varie significativamente durante o ensaio. Quando se trata de dispositivos de filmes finos, o que inclui os módulos compostos por células de multijunção (ao menos em uma das junções), este tempo não pode ser demasiadamente curto. Isto tem que ser levado em conta, pois tecnologias de filmes finos apresentam um efeito de capacitância difusiva (este efeito também se pronuncia em tecnologias de silício cristalino, mas de uma forma muito mais sutil, com exceção de dispositivos de alta eficiência), tal como é descrito em Friesen e Ossenbrinck (1997).

Ainda no que diz respeito a medidas para caracterização elétrica de dispositivos de multijunção, existe a questão da necessidade de correção espectral, visto que embora a resposta espectral do dispositivo como um todo possa ser larga, as respostas individuais de cada junção são estreitas e, dessa forma suscetíveis a mudanças na distribuição espectral. Além disso, por normalmente estarem conectadas em série, as junções precisam ser analisadas separadamente quando se realiza um processo de correção espectral. Considerando ainda que a tecnologia da célula de referência utilizada para a medida da irradiância não seja a mesma que a do dispositivo em ensaio, o fator de descasamento espectral precisa ser determinado. Um trabalho proposto por Gottschalg et al.(2003) apresenta uma análise de como a variação da distribuição espectral afeta diferentes tecnologias fotovoltaicas, entre as quais algumas baseadas em multijunções.

Este trabalho apresenta a metodologia empregada pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para ensaios de dispositivos de multijunção, sob iluminação natural, incluindo o processo de determinação do fator de descasamento espectral. Como exemplo, um grupo de 5 módulos *tandem* (duas junções) foram ensaiados. Estes ensaios compreendem a determinação dos coeficientes térmicos dos módulos, a partir dos quais, juntamente com a correção espectral se faz possível a translação da curva *I-V* para a condição padrão. Os resultados encontrados para os coeficientes térmicos e para os principais parâmetros elétricos, já transladados para a condição padrão, foram comparados com os informados pelo fabricante. Pode-se comprovar a presença do efeito Staebler-Wronski (Carlson e Wronski, 1976) devido à junção composta por silício amorfo.

## MEDIDA DA CURVA CARACTERÍSTICA I-V E DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES TÉRMICOS DO MÓDULO

Devido à capacitância difusiva, a corrente elétrica medida em um dispositivo fotovoltaico pode apresentar valores maiores ou menores do que o correto, dependendo do quão rápido a curva é varrida e da direção da varredura (de  $V_{OC}$  para  $I_{SC}$  ou de  $I_{SC}$  para  $V_{OC}$ ). Segundo alguns trabalhos como Gasparin e Krenzinger (2010) e Kuurne et al. (2008) este efeito começa a se tornar importante quando o tempo de varredura é inferior a casa dos 50 ms.

Tendo em conta efeitos como o de capacitância difusiva o tempo ajustado para a varredura de curvas de dispositivos de filmes finos fica entre 100 e 200 ms. Neste tempo o equipamento utilizado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS é capaz de medir um conjunto de 1000 pares de corrente e tensão, além do valor da irradiância, que é obtida por meio de uma célula de referência de silício monocristalino previamente calibrada em função de um piranômetro térmico. Todas as medidas são realizadas com uma resolução de 6 ½ dígitos. Uma descrição completa do equipamento de medida utilizado pelo LES pode ser encontrada em Gasparin (2009).

A determinação dos coeficientes térmicos é necessária, uma vez que a medida da curva na condição padrão sob iluminação natural é muitas vezes difícil de obter. A técnica adotada para a determinação dos coeficientes térmicos, o que inclui o coeficiente de variação com a temperatura da tensão de circuito-aberto, tensão de máxima potência, corrente de curto-circuito e máxima potência, é feita a partir da medida de curvas I-V com o módulo em regime de aquecimento. Este aquecimento é realizado simplesmente pela exposição do módulo à luz solar. De forma mais completa a técnica para a determinação dos coeficientes térmicos segue os passos que são descritos a seguir:

- a) O dispositivo a ser ensaiado é posicionado no interior de uma câmara condicionada giratória, que é apresentada na Figura 1, de forma que a sua temperatura possa ser controlada. O dispositivo deve ser protegido da radiação solar antes de se iniciarem os ensaios e sua orientação deve ser normal à radiação solar direta com a finalidade de evitar diferenças na irradiância incidente na célula de referência e no dispositivo em ensaio devido à reflexão.
- b) Ao iniciar a aquisição das curvas, a temperatura do módulo deve ser preferencialmente a menor possível dentro das condições do ensaio, preferencialmente inferior a 25 °C. Isto é desejável para que se obtenha um bom intervalo de temperatura entre as curvas I-V, visto que o valor máximo da temperatura que o módulo irá atingir é dependente da temperatura ambiente, irradiância solar e do coeficiente de absorção do módulo. Esta temperatura dificilmente ultrapassa a casa dos 60°C.
- c) O módulo é exposto à radiação solar. Determina-se uma curva característica a cada intervalo de temperatura (normalmente entre 2°C e 3°C), até que a temperatura do módulo atinja seu máximo valor para a condição do ensaio. É importante que o valor de irradiância média varie pouco entre as curvas medidas para a determinação dos coeficientes térmicos, uma vez que a influência da irradiância nas curvas não é desejada, já que pode interferir nos resultados. A máxima diferença entre o valor médio de irradiância medido para cada uma das curvas I-V é de 3%, isto com relação à média das irradiâncias medidas de todas as curvas. Isto corresponde, por exemplo, a um ensaio que possua curvas com valores de irradiância desde 776 W/m<sup>2</sup> até 824 W/m<sup>2</sup>, sendo o valor médio de irradiância da família de curvas igual a 800 W/m<sup>2</sup>. A máxima variação da irradiância ao longo da aquisição de uma única curva I-V também deve ser baixa. É tolerada uma variação de até 1% do valor médio da irradiância ao longo da aquisição de cada curva I-V. Isto significa que durante a aquisição de uma curva I-V, cujo valor médio da irradiância tenha sido de 1000 W/m<sup>2</sup>, esta mesma irradiância não pode ter atingido um valor inferior a 990 W/m<sup>2</sup> ou superior a 1010 W/m<sup>2</sup>. Em dias de céu limpo esta condição é facilmente atingida.
- d) Uma vez que as curvas I-V correspondentes a diferentes temperaturas tenham sido obtidas, todas essas curvas são corrigidas para a condição de irradiância média do ensaio (trata-se de uma translação na curva onde a temperatura é mantida a mesma que a medida). Este processo é muito importante, principalmente para a determinação do coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura ( $\alpha$ ), pois mesmo pequenas variações de irradiância afetam de forma significativa a determinação deste coeficiente. Como as correções são sempre feitas para pequenas variações de irradiância (da ordem máxima de 20 W/m<sup>2</sup>), é aplicado um método de translação geométrica, devido a sua simplicidade e confiabilidade em correções com pequenas diferenças de irradiância (Bühler, 2011).
- e) Após corrigidas as curvas I-V, os valores da tensão de circuito-aberto, tensão de máxima potência, corrente de curto-circuito e máxima são determinados para cada curva com alto grau de precisão de acordo com a metodologia descrita em Bühler (2011). De forma simplificada esta metodologia consiste em selecionar regiões específicas da curva I-V para a determinação de cada parâmetro, e por meio da aplicação de uma regressão por mínimos quadrados determinar o coeficiente desejado. Dessa forma a influência de eventuais ruídos na medida é significativamente reduzida.
- f) Na última etapa, cada um dos parâmetros é plotado em função da temperatura na qual foi medida a curva I-V e por meio de funções lineares são determinados os coeficientes térmicos do dispositivo em ensaio.

A Figura 2 apresenta um conjunto de curvas medidas (já corrigidas para a mesma irradiância) para um dos módulos utilizados na elaboração deste trabalho. A Figura 3 apresenta as curvas de determinação dos coeficientes térmicos do mesmo módulo.



Figura 1: Câmara condicionada giratória utilizada para ensaios de dispositivos fotovoltaicos, (a) vista externa e (b) vista interna.

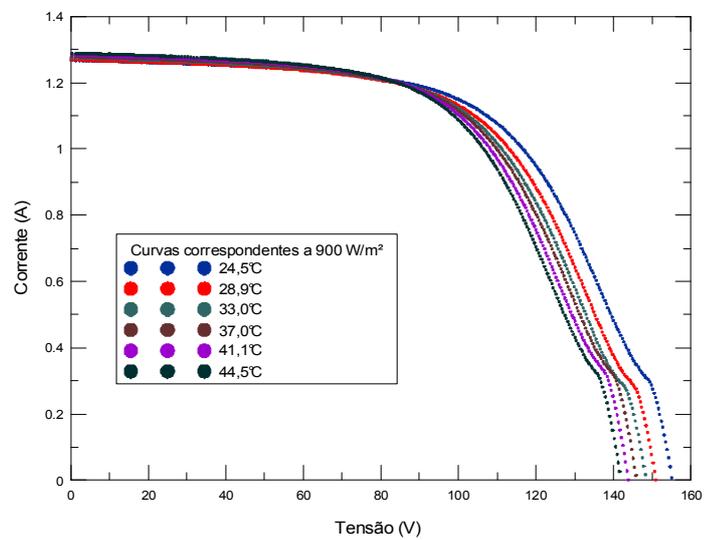
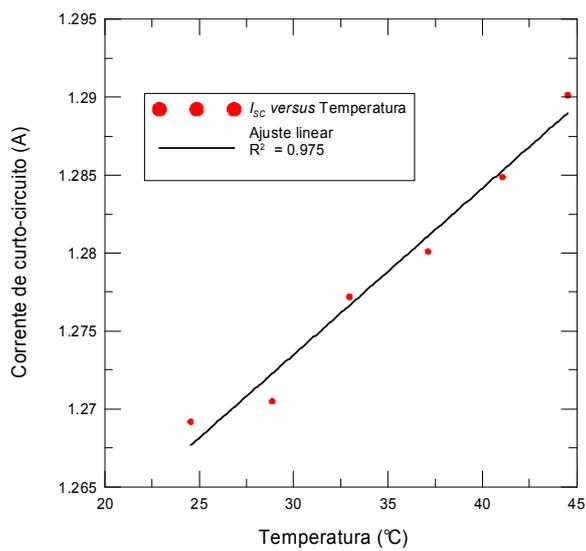
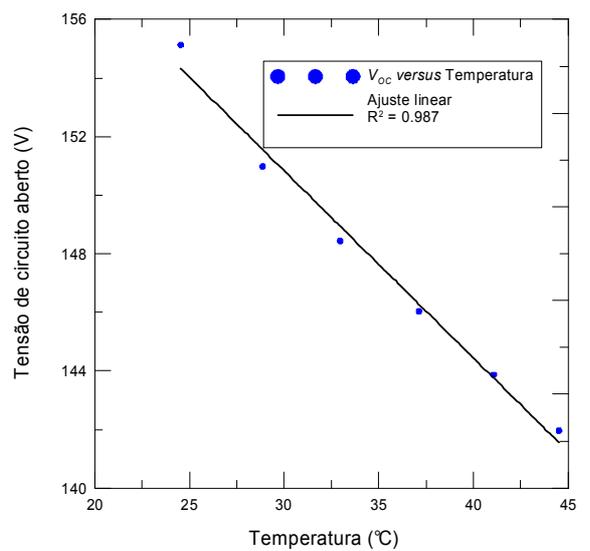


Figura 2: Curvas I-V medidas de um módulo de dupla junção (a-Si/c-Si) relativas à  $900 \text{ W/m}^2$  e diferentes temperaturas.



(a)



(b)

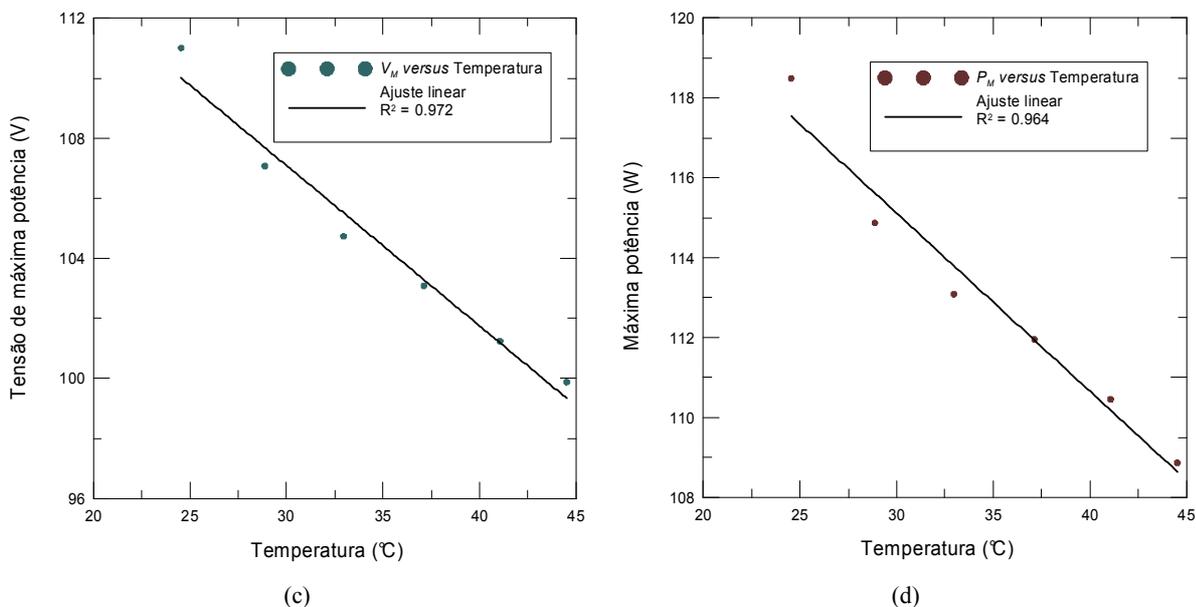


Figura 3: Determinação dos seguintes coeficientes térmicos do mesmo módulo apresentado na Figura 2: (a) corrente de curto-circuito, (b) tensão de circuito aberto, (c) tensão de máxima potência e (d) máxima potência.

Observando a Figura 2 nota-se que todas as curvas I-V medidas apresentaram um defeito próximo da região do curto-circuito. Este mesmo defeito foi observado em todas as curvas dos cinco módulos medidos para a elaboração deste trabalho. Foi realizado um ensaio que comprovou que este defeito não é proveniente de desuniformidade de irradiância. Possíveis causas podem ser atribuídas a células com sombreamento parcial nas bordas do módulo (causados pela própria moldura dos módulos), células defeituosas ou outros efeitos que podem ocorrer em tecnologias de multijunção. De qualquer forma, uma vez que o objetivo deste trabalho está centrado na análise do fator de descasamento espectral aplicada a módulos de multijunção, uma análise detalhada das possíveis causas deste defeito nas curvas I-V não será realizada neste momento.

As mesmas curvas I-V utilizadas para a determinação dos coeficientes térmicos foram também utilizadas para a obtenção do coeficiente de correção da curva  $K$ , de acordo com o procedimento descrito pela norma internacional IEC-891 (1987). O valor médio encontrado entre os cinco módulos analisados foi de  $-0,06 \Omega/^{\circ}\text{C}$ .

## CORREÇÃO ESPECTRAL

A correção espectral é necessária quando se deseja caracterizar um dispositivo fotovoltaico em uma distribuição espectral diferente da medida. Este procedimento consiste basicamente em integrar, em uma faixa de comprimento de onda na qual o dispositivo fotovoltaico é apresentada curva de resposta, o produto da distribuição espectral pela curva de resposta espectral. O cálculo do fator de descasamento espectral é obtido, segundo a norma americana ASTM E973-10 (ASTM, 2010), a partir da Equação (1). Este fator de descasamento espectral leva em conta não só a diferença entre o espectro medido e o espectro para o qual se deseja realizar a caracterização elétrica para o dispositivo em ensaio, mas também para a célula de referência. Esta célula aparece no cálculo, pois seria o sensor utilizado para medir a irradiância incidente e também possui a sua curva de resposta espectral.

$$M = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SR_{DE}(\lambda) E_{MED}(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} SR_{Cref}(\lambda) E_P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SR_{DE} E_P(\lambda) d\lambda \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} SR_{Cref} E_{MED}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

onde  $M$  é o fator de descasamento espectral,  $SR_{DE}$  e  $SR_{Cref}$  correspondem à curva de resposta espectral do dispositivo em ensaio e da célula de referência, respectivamente e  $E_{MED}$  e  $E_P$  correspondem à distribuição espectral na condição medida e na condição padrão ou outra qualquer, respectivamente. Os intervalos  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  a  $\lambda_4$  correspondem à faixa dentro da distribuição espectral na qual o dispositivo em ensaio e a célula de referência, respectivamente, apresentam resposta espectral.

Obviamente se as curvas de respostas do dispositivo em ensaio e da célula de referência forem iguais, não existe a necessidade de aplicar um processo de correção espectral, uma vez que o coeficiente de descasamento espectral resulta igual a 1.

Quando se aplica um procedimento de correção espectral para uma célula de mais de uma junção deve-se levar em conta que, estando as células ligadas em série, a corrente fornecida pelo conjunto será limitada pela menor corrente gerada por cada célula. Dessa forma a correção espectral deve ser feita individualmente para a curva de resposta de cada junção, pois isso permite encontrar a menor corrente gerada para uma dada distribuição espectral.

Para este trabalho foi determinado o fator de descasamento espectral de módulos fotovoltaicos compostos por uma célula de dupla junção de silício amorfo-microcristalino (a-Si/ $\mu$ c-Si). A Figura 4 apresenta a curva de resposta espectral de cada uma das junções de uma célula de dupla junção típica com a configuração anteriormente descrita. Até 500 nm apenas a célula de a-Si está ativa e a partir de 800 nm o mesmo ocorre com a célula de  $\mu$ c-Si. A irradiância entre 500 nm e 800 nm é aproveitada por ambas as células.

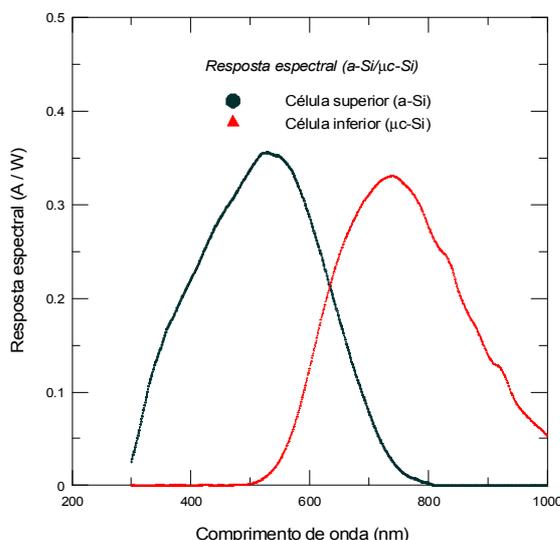


Figura 4 : Curva de resposta espectral para uma célula de dupla junção de silício amorfo-microcristalino típica. (Adaptado de Shah, 2004)

Tendo em conta alguns aspectos específicos para células de mais de uma união, o processo para a determinação do fator de descasamento espectral para uma célula multijunção realizado é descrito a seguir.

- Uma curva I-V do dispositivo em ensaio é medida. Considera-se que para a medida da irradiância incidente tenha sido utilizada uma célula de referência, por exemplo, de silício monocristalino.
- A distribuição espectral é medida. Neste trabalho foi utilizado um espectro radiômetro da marca Apogee, com faixa de medida entre 350 nm e 1000 nm.
- O arquivo medido é corrigido, levando em conta a resposta do sensor em função do comprimento de onda. Esta correção é feita aplicando um arquivo fornecido pelo fabricante do espectro radiômetro.
- A integral da distribuição espectral relativa à condição padrão ou outra qualquer é calculada. Esta integral deve ser realizada dentro da mesma faixa de comprimento de onda na qual o espectro da condição de medida foi tomado.
- A integral da distribuição espectral na condição de medida é calculada.
- É calculado um fator de intensidade de espectro relativo, que pode ser definido pela Equação (2). Este fator deve ser utilizado para que se possa igualar a distribuição espectral da condição medida com a condição padrão ou outra qualquer, de forma que a os valores das integrais dessas distribuições espectrais sejam iguais, variando apenas as suas formas da distribuição ao longo do comprimento de onda. Este procedimento deve ser executado sempre que a variação da resposta espectral na célula de referência, utilizada para a medida da irradiância, não estiver sendo levada em conta. Se a variação espectral na célula de referência for utilizada no cálculo da correção espectral, como apresentado na Equação (1), então a relação entre as intensidades dos espectros medidos e de referência se auto-ajustam.

$$IER = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_p(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{MED}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

- A distribuição espectral medida é multiplicada ponto a ponto pelo fator IER. A Figura 5 apresenta um exemplo de distribuição espectral medida, já multiplicada pelo fator IER juntamente com o espectro padrão G 173, dentro de uma faixa de 350 a 1000 nm.
- A Equação (1) é aplicada às curvas de resposta espectral de cada uma das junções individualmente e a densidade de corrente é calculada para as duas distribuições espectrais.
- O fator de descasamento espectral é calculado utilizando a menor densidade de corrente calculada (entre as duas junções) para cada uma das distribuições espectrais.

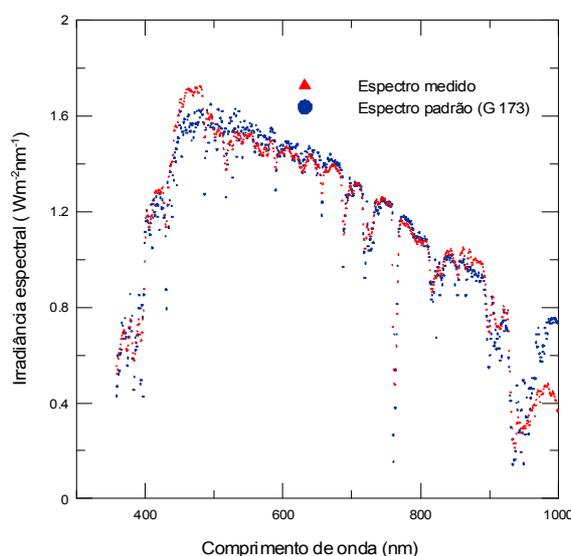


Figura 5: Irradiância espectral padrão (G 173) e medida para o dia 10 de junho de 2011 às 13h e 55min na cidade de Porto Alegre, Brasil. O espectro medido foi multiplicado por uma constante de forma que a integral deste se tornasse igual a do integral do espectro padrão.

A Tabela 1 apresenta os fatores de descasamento espectral determinados em cinco ocasiões diferentes através de medidas realizadas junto ao Laboratório de Energia Solar da UFRGS na cidade de Porto Alegre, Brasil. Nesta mesma tabela são apresentadas as massas de ar geométricas relativas a cada momento em que as medidas de espectro foram realizadas.

Data (d/m), hora(h:min)	Massa de ar (-)	M (-)
20/05, 11:30	1,94	1,02
30/05, 14:30	2,00	1,01
09/06, 12:10	1,66	1,01
09/06, 13:30	1,76	0,96
10/06, 13:50	1,83	1,00

Tabela 1: Massa de ar geométrica e fatores de descasamento espectral para módulos tandem de a-Si/ $\mu$ c-Si medidos em cinco ocasiões diferentes na cidade de Porto Alegre, Brasil.

Pode-se verificar pela análise da Tabela 1 que o fator de descasamento espectral apresentou valores idênticos mesmo quando as medidas da distribuição espectral foram realizadas com massas de ar iguais a 1,66 e 2,0. Por outro lado, em um mesmo dia, porém em horários diferentes, o fator de correção espectral variou de 1% a 4%, tendo em conta que as massas de ar relativas a essas medidas variaram somente de 1,60 a 1,76. Estas variações espectrais podem ser atribuídas a diferentes temperaturas, umidade e concentração de aerossóis na atmosfera. Outra questão interessante a se analisar é que devido à diferença entre as distribuições espectrais padrão e medida, um fator de descasamento espectral igual a 1 foi encontrado para uma massa de ar igual 1,83 o que mostra claramente que realizar medidas de curvas com massa de ar geométrica igual a 1,5, em algumas condições, pode não ser a escolha que minimiza a necessidade de correção espectral.

## COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM DADOS INFORMADOS PELO FABRICANTE

Para cada um dos cinco módulos analisados foi escolhida uma curva I-V medida em uma condição relativamente próxima da condição padrão. Estas curvas foram então transladadas para a condição padrão (utilizando o método da norma IEC 891, 1987), fazendo uso para isto do fator de descasamento espectral qual havia sido previamente determinado. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros elétricos dos cinco módulos analisados relativos à condição padrão com o sem a aplicação do fator de descasamento espectral.

Módulo	Dados de catálogo			Condição padrão*			M	Condição padrão**		
	$V_{OC}$	$I_{SC}$	$P_M$	$V_{OC}$	$I_{SC}$	$P_M$		$V_{OC}$	$I_{SC}$	$P_M$
#1				159,7	1,278	138,3	1,02	159,8	1,303	140,6
#2				152,8	1,318	132,7	1,01	152,8	1,331	134,0
#3	148,6	1,23	121	155,7	1,351	137,4	1,01	155,7	1,364	139,1
#4				156,7	1,426	143,0	0,96	156,6	1,369	137,0
#5				153,5	1,373	132,3	1,00	153,5	1,373	132,3

Tabela 2: Parâmetros elétricos (de catálogo e medidos com translação para a condição padrão com e sem correção espectral) dos cinco módulos analisados.

\*Sem correção espectral

\*\*Com correção espectral

A Figura 6 apresenta, para um dos módulos analisados, as curvas medida as curvas transladadas para a condição padrão com e sem a utilização do fator de descasamento espectral. Neste exemplo foi utilizado um fator M igual a 1,01.

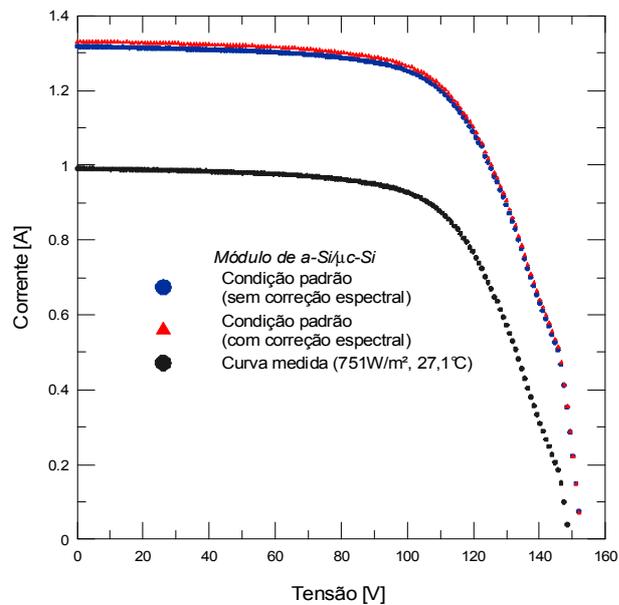


Figura 6: Curva medida para a condição de  $751 \text{ W/m}^2$  e  $27.1^\circ\text{C}$  e curvas transladadas para a condição padrão, com e sem a aplicação do fator de descasamento espectral.

Pode-se observar pelos dados da Tabela 2 que os parâmetros elétricos analisados foram superiores aos informados pelo fabricante em todos os casos, com ou sem a aplicação da correção espectral. Isto está de acordo com o esperado, pois devido à camada de silício amorfo, esses módulos estão sujeitos ao efeito Staebler-Wronski. Segundo este efeito módulos de a-Si degradam significativamente nos primeiros meses de operação até estabilizarem. Diversos trabalhos apontam que em cerca de 5 meses a estabilização já é praticamente atingida. Levando em conta este efeito, os dados informados pelos fabricantes são referentes aos valores que os dispositivos atingem após a estabilização, portanto, menores que os valores medidos quando o módulo ainda é novo, como o caso dos módulos utilizados neste trabalho.

## CONCLUSÕES

A correta caracterização de módulos baseados em tecnologias de multijunção envolvem aspectos importantes como a correção espectral do dispositivo em ensaio, uma vez que a resposta destas tecnologias podem variar significativamente com as variações do espectro solar. No caso estudado, os dispositivos de multijunção apresentaram a necessidade de correção espectral em função das respostas individuais de cada junção serem estreitas. Pode-se observar também que a realização de medidas de curvas com massa de ar geométrica igual a 1,5, em algumas condições, pode não ser a escolha que minimiza a necessidade de correção espectral.

A potência medida foi da ordem de 13% maior do que a informada pelo catálogo, confirmando a prática dos fabricantes de módulos de silício amorfo em apresentar no catálogo os dados para o módulo já estabilizado após a degradação que ocorre com a exposição à radiação solar.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- ASTM, (2010). American Society for Testing and Materials - ASTM E973-10. Determination of the Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell.
- ASTM, (2008). American Society for Testing and Materials - ASTM G173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on  $37^\circ$  Tilted Surface.
- 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.
- Carlson, D. E. and Wronski, C. R., (1976). Amorphous Silicon Solar Cells, Applied Physics Letters 28, 671-673.
- Friesen, G. e Ossenbrinck, H. A., (1997). Capacitance effects in high-efficiency cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 48, 77-83.
- Gasparin, F. P., (2009). Desenvolvimento de um traçador de curvas características de Módulos Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- Gasparin, F. P. e Krenzinger, A., (2010). Influência da varredura de tensão na medida da curva característica de módulos fotovoltaicos de silício amorfo. In: III CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2010, Belém - PA. Anais do III Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Gottschalg, R., Infield, D. G. e Kearney, M. J., (2003). Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 79, 527-537.

King, D. L., Hansen, B. R., Moore, J. M e Aiken, D. J., (2000). New Methods for Measuring Performance of Monolithic Multi-Junction Solar Cells. Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the 28<sup>th</sup> IEEE, 1197 – 1201.

Kuurne, J., Tolvanen, A. e Hyvärinen, J., (2008). Sweep time, spectral mismatch and light soaking in thin film module measurements. Conference Records of the 33<sup>rd</sup> IEEE PVSC, San Diego.

IEC, (1987). International Electrotechnical Commission – IEC-891. Procedures irradiance correction to measured *I-V* characteristics of crystalline silicon devices for temperature and irradiance.

Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M. e Poggi, P., (2006). Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy*, 31, 553-567.

Shah, A. V., Schade, H., Vanecek, M., Meier, J., Vallat-Sauvain, E., Wyrsh, N. Droz, C. e Bailat, J., (2004). Thin-film Silicon Solar Cell Technology. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 12, 113-142.

## ABSTRACT

### METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF THE SPECTRAL MISMATCH PARAMETER OF MULTIJUNCTIONS PHOTOVOLTAIC MODULES

Photovoltaic devices with more than one PN junction, known as multi-junction, has been developed and studied in recent times primarily with the goal of obtaining a wider spectral response range and consequently increase the photovoltaic conversion efficiency. On the other hand, multi-junction cells have particular characteristics which require specific methods for testing the electrical characterization, particularly as regards the determination of the spectral correction factor, which has to be performed for each cell junction and cannot be neglected in many cases. This work presents the methodology employed by the Solar Energy Laboratory at the Federal University of Rio Grande do Sul for testing the multi-junction modules. As an example, a group of 5 *tandem* (two junctions) modules were tested and the results showed that corrections up to 4% must be performed.

**Keywords:** Photovoltaic module, *I-V* characteristic curve, spectral response, multi-junction cells, photovoltaic module characterization.