

**Influência do Fator de Correção Espectral na Caracterização de Módulos Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias<sup>1</sup>**

Alexandre José Bühler<sup>2</sup>, Giuliano Arns Rampinelli<sup>3</sup>, Fabiano Perin Gasparin<sup>4</sup> Arno Jrenzinger<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Aceito para publicação no 2º Trimestre de 2015.

<sup>2</sup>Instituto Federal do Rio Grande do Sul- IFRS, purpleblind@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, giuliano.rampinelli@ufsc.br

<sup>4</sup>Universidade Estadual do Rio Grande do Sul- UERGS, gasparin.fabiano@gmail.com

<sup>5</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, arno.krenzinger@ufrgs.br

**RESUMO:** A caracterização elétrica de um dispositivo fotovoltaico é de fundamental importância na avaliação da eficiência de conversão do mesmo, permitindo avaliar com determinado grau de precisão a energia que um sistema fotovoltaico é capaz de converter em certo período e sob específicas condições de operação. O grau de precisão da caracterização elétrica de um dispositivo fotovoltaico está entre outros aspectos, ligado ao fator de descasamento espectral, uma vez que a determinação da curva I-V não tenha sido feita sob o espectro padrão no qual se deseja conhecer o comportamento do dispositivo e uma vez que não tenha sido utilizada uma célula de referência de mesma tecnologia para a medida da irradiância. Este trabalho apresenta a metodologia empregada pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para a determinação e avaliação do fator de correção espectral para diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos. Foi realizado um estudo do efeito do fator de correção espectral para duas distribuições espectrais distintas na caracterização de oito módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias e os resultados indicaram correções de até 7%, comprovando a importância desse processo na caracterização de dispositivos fotovoltaicos.

**Palavras chave:** Módulos fotovoltaicos, resposta espectral, filmes finos.

## **INFLUENCE OF SPECTRAL CORRECTION FACTOR IN PHOTOVOLTAIC MODULES OF THE DIFFERENT MATERIALS**

**Abstract:** The electrical characterization of a Photovoltaic (PV) device has a fundamental role in the evaluation of the efficiency conversion leading to a correct forecast of the amount of energy a PV array is able to convert under specific operation conditions. The precision of the electrical characterization of a PV device is connected to the spectral mismatch parameter, since the I-V curve have been measured under a different condition of spectral distribution than the condition in which the device has to be rated and since a reference cell with the same technology have not been used to measure the irradiance. This paper presents the methodology employed by the Solar Energy Laboratory (LES) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) for the determination and evaluation of the spectral mismatch parameter applied in different technologies of PV modules. It was performed a study of the impact of the spectral mismatch parameter for two measured spectral distributions in eight different technologies of PV modules and the results indicated corrections up to 7% corroborating the importance of this process in the characterization of PV devices.

**Keywords:** Photovoltaic modules, spectral response, thin films.

### **1. INTRODUÇÃO**

A resposta espectral, que corresponde à sensibilidade do material em gerar corrente a partir de um comprimento de onda específico incidente, determina a eficiência de uma célula fotovoltaica. Essa eficiência depende, portanto, da distribuição espectral da radiação incidente. Dessa forma, sempre que se desejar conhecer o comportamento de um dispositivo fotovoltaico em uma distribuição espectral diferente da qual este módulo foi medido, é necessário que o chamado fator de descasamento espectral seja determinado.

Caso seja utilizada para medir a irradiância incidente uma célula de referência com mesma tecnologia que o dispositivo em ensaio, o fator de descasamento espectral é igual a 1, ou seja, sem efeito no processo de caracterização elétrica do dispositivo. Isto ocorre uma vez que tendo curvas de respostas espectrais iguais, célula de referência e dispositivo em ensaio,

todo o efeito causado pela diferença entre as duas distribuições espectrais ocorre exatamente da mesma forma em ambos os dispositivos resultando assim em um fator de descasamento espectral neutro (igual a 1). Entretanto, devido ao crescente número de tecnologias empregadas na fabricação de células fotovoltaicas é muitas vezes difícil dispor de uma célula de referência para cada uma das tecnologias existentes.

Além disso, existem tecnologias que apresentam efeitos de degradação muito fortes, principalmente nos primeiros meses de uso, como o silício amorfo, de forma que células de referência deste material perderiam a sua referência de calibração muito rapidamente (RÜTHER *et al.*, 2002). Nestas situações, normalmente se opta por utilizar uma célula de um material mais estável, como o silício monocristalino, ou ainda a utilização de um piranômetro térmico, que possui a vantagem de ter uma resposta espectral bastante ampla, porém a desvantagem de possuir um tempo de resposta muito maior que uma célula de referência (BÜHLER *et al.*, 2010). A Figura 1 apresenta a resposta espectral do piranômetro térmico e do piranômetro fotovoltaico.

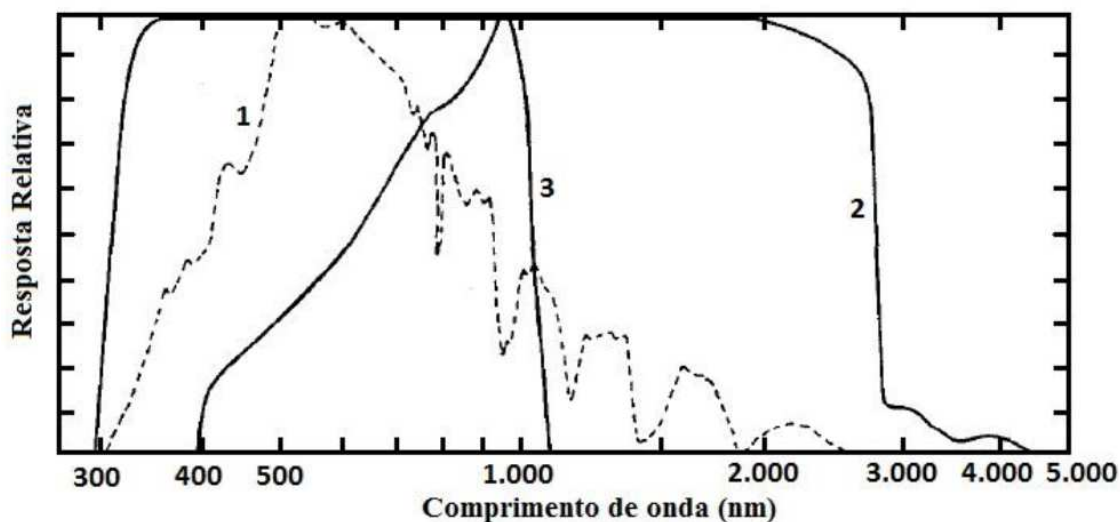


Figura 1 – Distribuição espectral da radiação solar na superfície terrestre (1), resposta espectral do piranômetro térmico (2) e resposta espectral do piranômetro fotovoltaico (3).

Fonte: (ALADOS-ARBOLETA *et al.*, 1995).

Resumidamente, tanto quando se utiliza um piranômetro térmico, como quando se utiliza uma célula de referência de um material diferente do dispositivo em ensaio, a correção espectral deve ser determinada, uma vez que em muitos casos esta pode resultar em diferenças

de até 10% variando significativamente ao longo da hora do dia e ao longo do ano (FABERO; CHENLO, 1991).

No caso das tecnologias de multijunção, o processo de correção espectral possui uma importância ainda maior, visto que 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 necessidade da correção espectral em dispositivos de multijunção também é importante, visto que embora a resposta espectral desses dispositivos 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 determinação do fator de descasamento espectral de dispositivos de mono e multijunção aplicada a espectros medidos na cidade de Porto Alegre/RS em dois dias distintos.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Foram pesquisadas na literatura respostas espectrais de diferentes tecnologias de dispositivos, de simples junção e multijunção. Foram medidos com o auxílio de um espectro radiômetro da marca Apogee, com faixa de medida entre 350 nm e 1000 nm, o espectro solar dos dias 20 de maio (11h e 30 min) e 09 de junho de 2011 (12 h e 10 min), na cidade de Porto Alegre/RS, Brasil. Os horários apresentados correspondem ao fuso horário de Brasília/DF, Brasil. A Tabela 1 apresenta as diferentes tecnologias estudadas neste trabalho.

Tabela 1. Tecnologias de células fotovoltaicas utilizadas para a análise do impacto e influência do fator de correção espectral.

<b>Sigla</b>	<b>Material</b>
CIGSS (CdS/CuInGaSSe)	Disseleneto de cobre-índio-gálio-enxofre
CIS (CuInSe <sub>2</sub> )	Disseleneto de cobre-índio
mc-Si	Silício Multicristalino
m-Si	Silício Monocristalino
CdS/CdTe	Telureto de Cádmio
a-Si/a-Si/a-Si:Ge	Silício amorfo de tripla junção
a-Si/a-Si:Ge	Silício amorfo de dupla junção
GaAs/GaInP	Dupla junção de Arseneto de Gálio e fosfeto de gálio-índio

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 apresenta 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.

Observando a Equação (1) fica evidente que 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 resultante é 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. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam as curvas de resposta espectral dos materiais utilizados neste estudo.

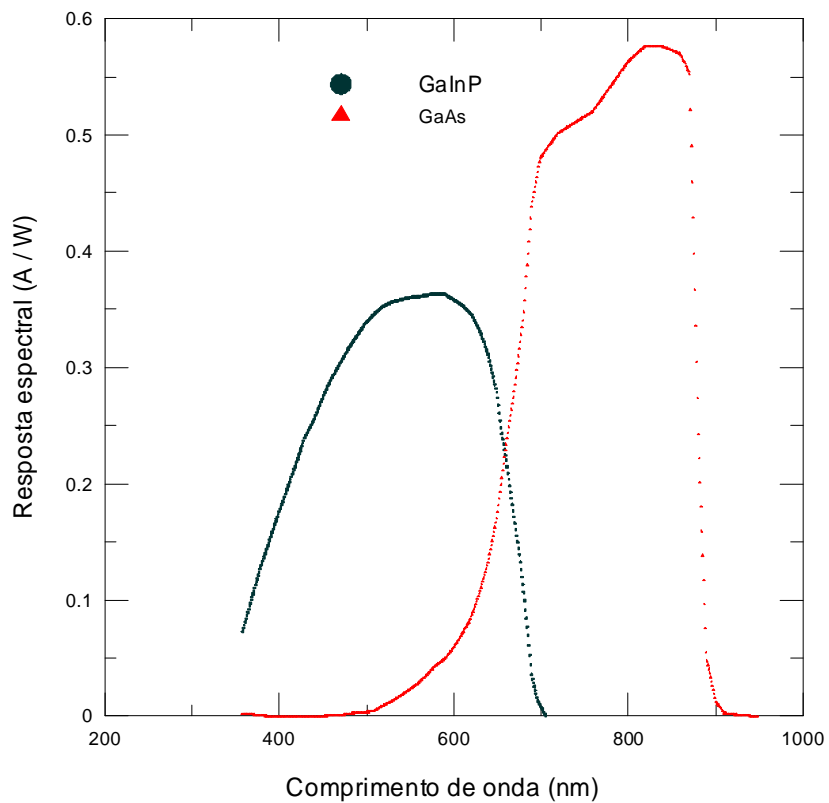


Figura 2 – Curvas de resposta espectral de uma célula de dupla junção (GaAs/GaInP).

Fonte: KING *et al.* (2000).

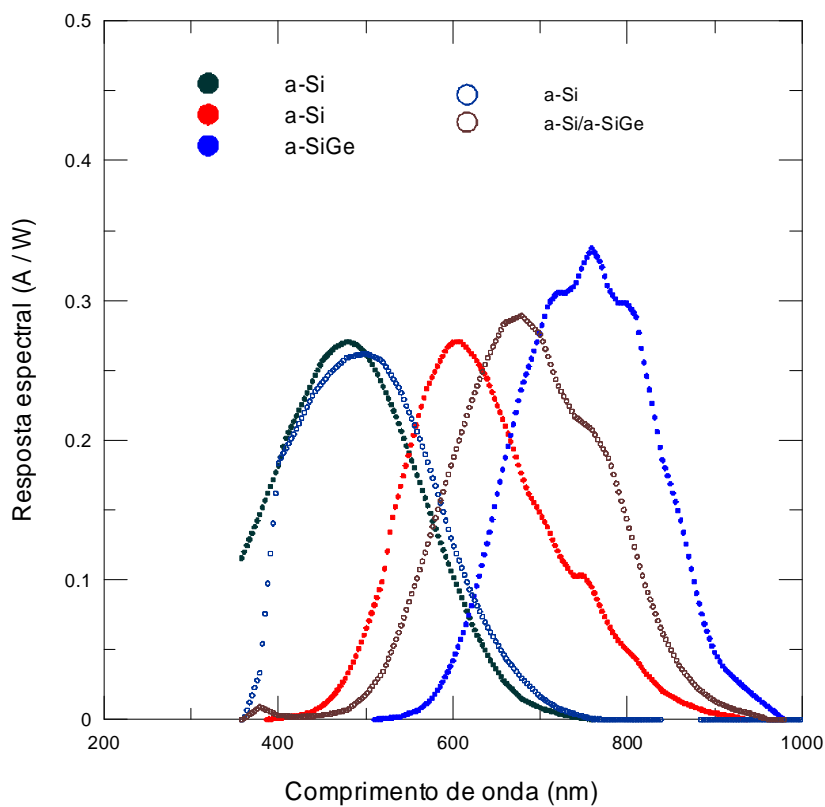


Figura 3 – Curvas de resposta espectral de uma célula de dupla junção e uma de tripla junção, com configurações ligeiramente distintas.

Fonte: MARION *et al.* (1999).

Como o espectro radiômetro utilizado possui uma faixa de resposta até 1000 nm, todas as curvas de resposta espectral mostradas na Figura 4 são apresentadas somente até este valor, mesmo que eventualmente algumas dessas curvas possuam uma faixa de resposta maior.

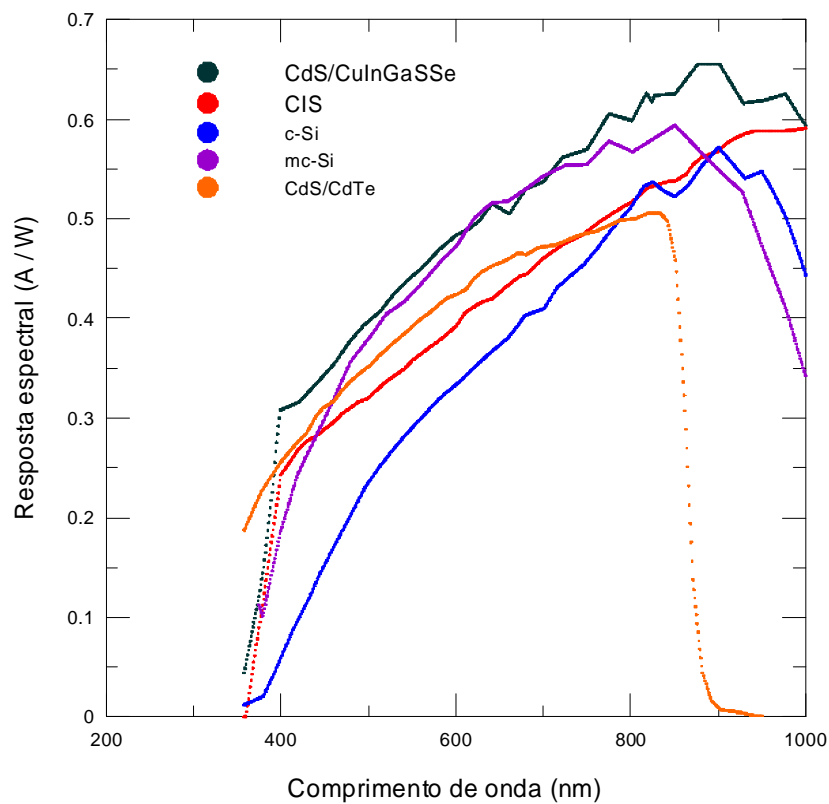


Figura 4 – Curvas de resposta espectral de células de simples junção. Fonte: MARION *et al.* (1999).

Tendo em conta alguns aspectos específicos para células de mais de uma junção, o processo realizado para a determinação do fator de descasamento espectral para uma célula fotovoltaica é descrito nos passos de (a-f).

- a) 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.
- b) A integral da distribuição espectral na condição de medida é calculada.
- c) 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 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.

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

- d) A distribuição espectral medida é multiplicada ponto a ponto pelo fator IER.
- e) 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.
- f) O fator de descasamento espectral é calculado utilizando a menor densidade de corrente calculada (entre as duas junções) para cada uma das distribuições espectrais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a determinação e avaliação do fator de correção espectral para diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos foi realizado um estudo do efeito do fator de correção

espectral para duas distribuições espectrais distintas na caracterização de oito módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias.

Foram medidos com o auxílio de um espectro radiômetro da marca Apogee, com faixa de medida entre 350 nm e 1000 nm, o espectro solar dos dias 20 de maio (11h e 30 min) e 09 de junho de 2011 (12 h e 10 min), na cidade de Porto Alegre/RS, Brasil.

A Figura 5 apresenta a distribuição espectral padrão (G173) bem como as duas distribuições espectrais medidas utilizadas neste trabalho, já multiplicadas pelo fator IER. Todas as distribuições espectrais são apresentadas dentro de uma faixa de 350 a 1000 nm. O espectro medido foi multiplicado por uma constante de forma que a integral deste se tornasse igual a da integral do espectro padrão.

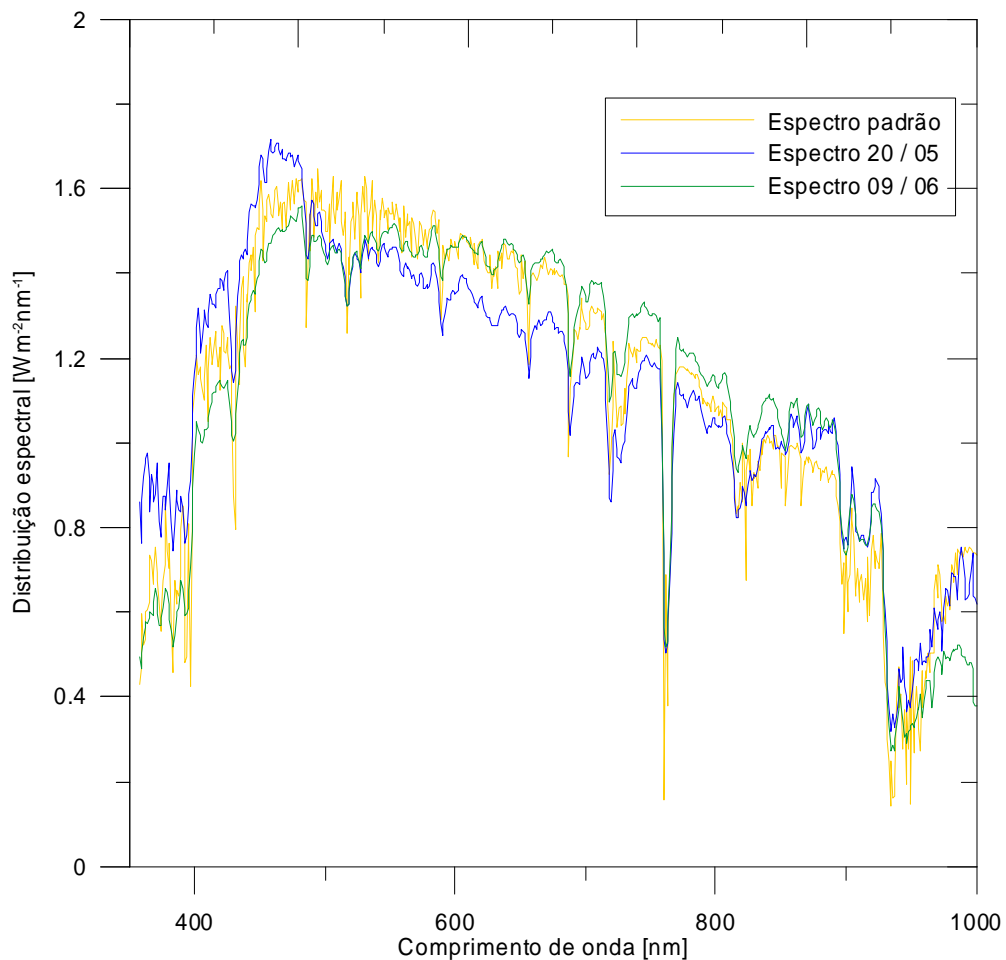


Figura 5 – Irradiância espectral padrão (G 173) e distribuições espectrais medidas na cidade de Porto Alegre, Brasil.

A Tabela 2 apresenta alguns detalhes referentes às condições nas quais as distribuições espectrais utilizadas neste trabalho foram medidas, como, por exemplo, as massas de ar geométricas relativas a cada momento em que as medidas de espectro foram realizadas.

Tabela 2: Detalhes relativos às medidas das distribuições espectrais realizadas na cidade de Porto Alegre, Brasil.

<b>Data (d/m), hora(h:min)</b>	<b>Massa de ar ( - )</b>	<b>Latitude/ Longitude</b>
20/05, 11:30	1,60	30°/ -51°
09/06, 12:10	1,66	30°/ -51°

A Figura 6 apresenta os valores de  $M$  encontrados para as duas situações em que distribuições espectrais foram medidas.

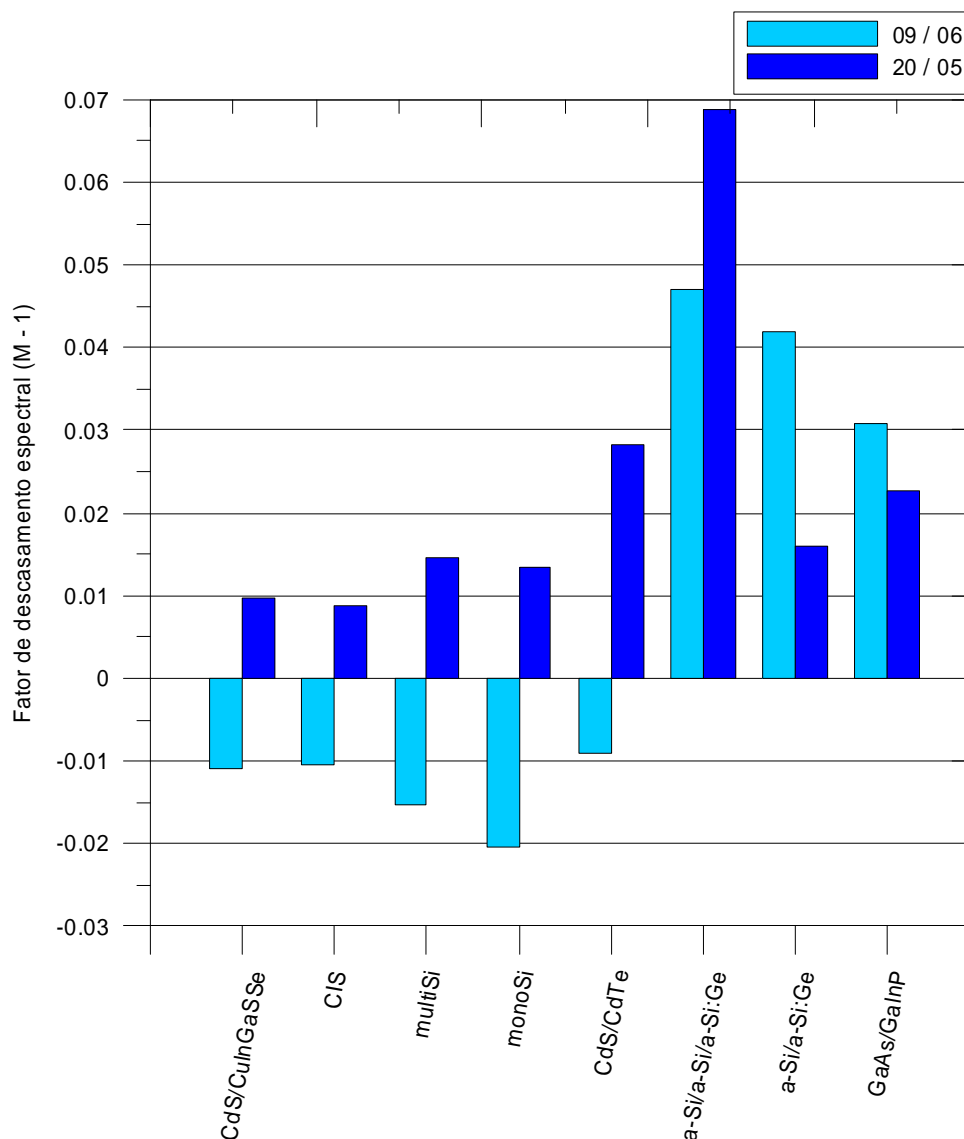


Figura 6 – Fatores de descasamento espectral relativo ( $M-1$ ) determinado para as diferentes tecnologias fotovoltaicas analisadas.

Observa-se que mesmo tendo sido medidas em dias próximos e em horários próximos do meio-dia solar, as distribuições espectrais divergiram entre si a ponto fazer com que várias tecnologias tivessem valores positivos de  $M$  em uma ocasião e negativas em outras. Este efeito está diretamente relacionado com a parcela da curva de resposta que é atingida pela parte da distribuição espectral que mudou em relação ao espectro padrão, que foi o utilizado para o cálculo de  $M$ .

Os resultados são apresentados na Figura 6 na forma de  $M-1$  para facilitar a visualização do efeito que o fator de correção espectral teria quando aplicado na curva  $I-V$  de um dispositivo fotovoltaico. Dessa forma, valores negativos significam que a medida do

dispositivo está maior do que seria no espectro padrão. Valores positivos indicam que os valores medidos do dispositivo fotovoltaico estão menores do que seriam no espectro padrão.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os fatores de descasamento espectrais encontrados para as duas medidas realizadas de distribuição espectral destacam que este procedimento é importante em processos de caracterização elétrica de dispositivos fotovoltaicos, já que foi encontrado um fator de descasamento espectral de quase 7%.

Percebe-se claramente que diferentes materiais podem responder de formas distintas frente a variações na distribuição espectral. Fica claro que a determinação do fator de descasamento espectral não pode ser negligenciada, principalmente em dispositivos de resposta mais estreita e em dispositivos de multijunção, que em geral apresentarão os resultados mais significativos. Neste trabalho a influência da célula de referência como medidor da irradiância incidente não foi levada em consideração. Certamente se isto tivesse sido feito, os resultados não seriam os mesmos podendo conduzir a valores ainda maiores de  $M$ , embora certamente para tecnologias com curvas de resposta mais parecidas com a curva da célula de referência os valores de  $M$  seriam menores.

#### ***Agradecimentos***

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

## REFERÊNCIAS

- ALADOS-ARBOLETA, L.; BATLLES, F. J.; OLMO, F. J. Solar radiation resource assessment by means of silicon cells. *Solar Energy*, v. 54, issue 3, 1995, pp. 183-191.
- ASTM, American Society for Testing and Materials - ASTM E973-10. Determination of the Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell. 2010.
- ASTM, American Society for Testing and Materials - ASTM G173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. 2008.
- BÜHLER, A. J.; GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A., (2011). Análise da medida da temperatura de módulos fotovoltaicos em ensaios de caracterização elétrica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 14, 2011, pp. 09-16.
- BÜHLER, A. J. Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Pós-Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos. Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre. 2011.
- FABERO, F.; CHENLO, F. Variance in the solar spectrum with the position of the receiver surface during the Day for PV applications. *Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE Press, New York, 1991, pp. 812–817.
- GOTTSCHALG, R.; INFELD, D. G.; KEARNEY, M. J. Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 79, issue 4, 2003, pp. 527-537.
- KING, D. L.; HANSEN, B. R.; MOORE, J. M.; AIKEN, D. J. New methods for measuring performance of monolithic multi-junction solar cells. *Photovoltaic Specialists Conference*, 2000. Conference Record of the 28<sup>th</sup> IEEE, 2000, pp. 1197 – 1201.
- MARION, B.; KROPOSKI, B.; EMERY, K.; DEL CUETO, J.; MYERS, D.; OSTERWALD, C. Validation of a photovoltaic module energy ratings procedure at NREL. NREL Technical Report. 1999.
- RÜTHER, R.; KLEISS, G.; REICHE, K. Spectral effects on amorphous silicon solar module fill factors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 71, issue 3, 2002, pp. 375–385.