

QUALIFICAÇÃO ESPECTRAL DE SIMULADORES SOLARES PARA ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Eurides Ramos Costa - didircosta@gmail.com

Carolina Defferrari - sdefferrari@gmail.com

Arno Krenzinger - arno.krenzinger@ufrgs.br

Laboratório de Energia Solar, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Resumo. *Com o advento de novas tecnologias de módulos fotovoltaicos, o fator de descasamento espectral decorrente da utilização de células de referência de silício cristalino em ensaios de dispositivos com respostas espectrais diferentes tornou-se crítico. Neste contexto, a qualidade do simulador solar é de extrema importância e o fator de descasamento espectral não pode ser negligenciado, devendo ser estudado para delimitar precisamente o alcance dessa variável. O objetivo deste trabalho é analisar até onde a qualidade do simulador SunSim 3C do LABSOL-UFRGS é adequada para realizar ensaios de todas as tecnologias fotovoltaicas sem a necessidade de realizar a correção espectral. Para tal, foi adotada uma metodologia que permite estabelecer com boa exatidão o erro devido apenas ao “mismatch” do flash para cada tecnologia em estudo, medindo simultaneamente o flash com a célula de silício cristalino como padrão e com um conjunto de células de referência com sensibilidades espectrais relativas correspondentes a diferentes tecnologias de filmes finos. O simulador SunSim 3C, ao ser utilizado para ensaios das tecnologias representadas pelas células de referência produz erros nos resultados entre 1 e 6%, se a célula padrão tem a resposta espectral do silício cristalino. Com base nos resultados conclui-se que é necessário utilizar células de referência de mesma tecnologia de cada módulo ou outra forma de corrigir a curva medida com o descasamento espectral.*

Palavras-chave: *Simulador Solar, Irradiância Espectral, Erro de Descasamento Espectral.*

1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos fotovoltaicos podem ser caracterizados sob a iluminação natural ou com o uso de simuladores solares. Embora os ensaios sob a iluminação natural produzam resultados confiáveis, o crescimento rápido da produção de módulos fotovoltaicos aliado ao surgimento de novas tecnologias de fabricação acarreta a necessidade de caracterização em massa dos módulos, o que necessariamente requer o uso de simuladores solares, pois as desvantagens inerentes dos ensaios sob a iluminação natural são na maioria dos casos impeditivas em medidas de larga escala, já que o tempo disponível de altos níveis de irradiância solar é limitado pela hora do dia, pela época do ano e principalmente pelas condições climáticas. Entretanto, a caracterização de desempenho para módulos fotovoltaicos de filme fino com o uso de simuladores solares requer cuidados especiais por causa da natureza complexa dos dispositivos em comparação com os de silício cristalino convencional. Deste modo, o conhecimento sobre a intensidade e distribuição espectral da irradiância solar é extremamente importante para o correto dimensionamento de sistemas que utilizam a energia solar. Segundo (Haag et al., 2012) superfícies seletivas, como módulos fotovoltaicos possuem respostas espectrais distintas que variam em função da tecnologia utilizada na sua fabricação. Alguns módulos fotovoltaicos empregam a tecnologia de múltipla junção visando o aproveitamento da energia solar em uma ampla faixa espectral. Nestes módulos, associam-se em série normalmente duas ou três células de diferentes materiais sobrepostas. Sendo a corrente elétrica que circula nesta associação idêntica para cada junção, logo a corrente total será definida pela célula de menor corrente. Como cada junção apresenta uma resposta espectral distinta, variações espectrais da radiação solar podem acarretar uma grande variação da eficiência de conversão de energia em relação às condições de calibração. (Marion, B., 2010), apresenta resultados que mostram variações de até 60% para módulos de tripla junção em razão de variações espectrais. Com o advento de novas tecnologias, o fator de descasamento espectral, decorrente da utilização de células de referência de silício cristalino em ensaios de dispositivos com resposta espectral diferente ficou mais crítico (Relatório IEA-PVPS T13-02, 2014). Neste contexto, a qualidade do simulador é de extrema importância e o fator de descasamento espectral não pode ser negligenciado, devendo ser estudado para delimitar precisamente o alcance dessa variável. A escolha de uma célula de referência mais apropriada entre as variedades de amostras filtradas pode ser feito, em primeiro lugar, e como sugerido por (H. Stiebig et al., 2010), pela escolha da célula de referência que mostra a mesma resposta (ou variações mínimas), para pequenas variações espectrais como o dispositivo de teste. Na verdade, a utilização de uma célula de referência perfeitamente correspondente ignora o cálculo de correção de descasamento de resposta espectral

através de medições espectrais e pode ser uma ferramenta prática para os laboratórios que não podem executar tais medições. Uma discussão sobre o impacto do descasamento espectral em ensaios de caracterização de módulos fotovoltaicos pode ser encontrado em (Gasparin et al., 2012).

Os simuladores solares são classificados pela norma da Comissão Internacional de Eletrotécnica (International Electrotechnical Commission, IEC, 60904-9ed 2, 2007). A norma relaciona três categorias de qualidade: casamento espectral, não uniformidade espacial e instabilidade temporal. Cada categoria é selecionada de acordo com três classes: A, B ou C. O casamento espectral, no entanto, está qualificado com um sistema limitado ao alcance das células de silício cristalino. Portanto, nada garante que um módulo de tecnologia de filmes fino seja adequadamente avaliado com o uso de um simulador solar classe AAA (o melhor segundo a respectiva norma), pois além da diferença de resposta espectral há o efeito de tempo de varredura durante a medição, já detectado em (Gasparin e Krenzinger, 2011). Entretanto, os simuladores solares comerciais aproximam-se marginalmente da distribuição espectral da radiação solar e a distribuição espacial, bem como a estabilidade temporal, possuem não uniformidades intrínsecas. A maioria dos simuladores solares são do tipo pulsado, com duração do “flash” tipicamente da ordem de 10 ms.

Uma medição precisa da resposta espectral e espectro de simulador é de extrema importância para correções de incompatibilidade espectrais ou a estimativa do erro de incompatibilidade espectral quando é aplicada sem nenhuma correção espectral. Neste sentido, mediante as ofertas de mercado e de experiências relatadas por pesquisadores da área, o Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) adquiriu um simulador solar modelo “SunSim 3C”, fabricado pela empresa suíça PASAN (Souza et al., 2012). Foram levados em conta aspectos como o custo, a área iluminada de 2,0x2,0 m, suficiente para a maioria dos módulos comerciais existentes, a duração do pulso de luz (10 ms) e, principalmente as características espectrais, espaciais e temporais, excedendo a classificação AAA da norma IEC 60904-9. É importante salientar, que o mesmo tipo de simulador foi adquirido, posteriormente, por mais três laboratórios de energia solar no Brasil, os quais têm possibilitado a realização dos testes de conformidade para módulos fotovoltaicos exigidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para além de facultar oportunidades para diversas pesquisas na área de energia solar.

Após uma análise teórica, a qual será explicitada mais adiante, realizada com dados espectrais da lâmpada do simulador fornecidos pelo fabricante, considerou-se que poderia ser possível medir alguns módulos de filmes finos mesmo usando células de referência de silício cristalino. O objetivo deste trabalho, é verificar se esta previsão se confirma e se a qualidade da distribuição espectral é efetivamente suficiente para dispensar as referências de tecnologias específicas.

1.1 Fator de correção espectral

A norma (IEC 60904-7, 2008) descreve os procedimentos para a correção do erro introduzido na caracterização de um dispositivo fotovoltaico causado pelo descasamento entre a distribuição espectral da radiação incidente utilizada no ensaio e o espectro de referência AM 1.5, tendo em conta a resposta espectral na célula de referência do dispositivo sob teste. A distribuição espectral da irradiância incidente no dispositivo fotovoltaico no momento da caracterização elétrica deve ser determinada a fim de possibilitar as correções para obter o desempenho que o dispositivo fotovoltaico teria sob distribuição espectral de referência AM 1.5 ou outra qualquer (Gasparin et al., 2012). Além da distribuição espectral da radiação, é necessário conhecer a curva da resposta espectral da célula de referência utilizada para medida da radiação solar e a curva de resposta espectral do dispositivo sob teste. De posse de todas estas informações é possível determinar o fator de descasamento espectral (MM) por meio da Eq. (1).

$$MM = \frac{\int E_{ref}(\lambda)S_{ref}(\lambda)d\lambda \int E_{med}(\lambda)S_{amostra}(\lambda)d\lambda}{\int E_{med}(\lambda)S_{ref}(\lambda)d\lambda \int E_{ref}(\lambda)S_{amostra}(\lambda)d\lambda} - 1 \quad (1)$$

onde:

$E_{ref}(\lambda)$ é a irradiância espectral

$E_{med}(\lambda)$ é a irradiância espectral incidente no momento da medida

$S_{ref}(\lambda)$ é a resposta espectral da célula de referência utilizada para medida da irradiância solar

$S_{amostra}(\lambda)$ é a resposta espectral do dispositivo fotovoltaico em teste

A corrente de curto circuito (I_{SC}) da célula solar medida pode ser corrigida utilizando a Eq. (2) com base no erro de descasamento espectral acima (MM).

$$I_{SC} = \frac{I_{SCref}}{MM+1} \quad (2)$$

Caso o módulo fotovoltaico apresente mais de uma junção PN com diferentes respostas espectrais, deve-se realizar o cálculo da integral da Eq. (1) [$\int E_{med}(\lambda)S_{amostra}(\lambda)d\lambda$] e verificar qual a junção PN que possui a menor densidade de

corrente no espectro medido. Como as camadas são dispostas em série nas células com mais de uma junção, a corrente menor será a corrente limite do circuito. Sendo assim, a resposta espectral que deve ser considerada é a resposta da tecnologia da camada de menor corrente.

Os módulos fotovoltaicos com tecnologias diferentes apresentam diferentes respostas espectrais, como pode ser visto nas curvas de resposta espectral relativa entre as tecnologias (CdTe, CIGS, a-Si, a-Si Tandem, Si-C) apresentadas na Fig. 1.

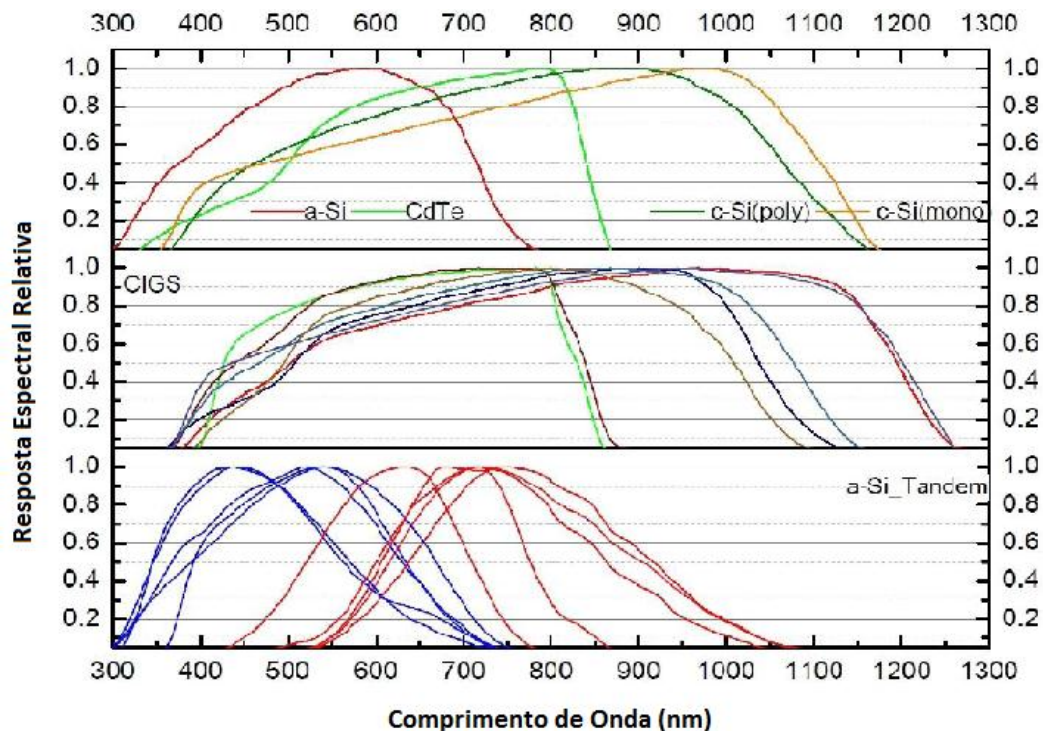


Figura 1 - Sinal de resposta espectral relativa de diferentes módulos, ilustrando diferenças significativas dentro da mesma tecnologia de película fina (Report IEA-PVPS T13-02, 2014).

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

O LABOSOL-UFRGS adquiriu, recentemente, um conjunto de seis modelos de células de referência, da marca Konica Minota, com várias sensibilidades espectrais relativas que vão permitir que se selecione o ajuste adequado para as necessidades. Na Tab. 1 são apresentados os seis modelos de células destacando-se a corrente de curto circuito e a tecnologia representativa, enquanto que na Fig. 2 estão representadas as respectivas respostas espectrais.

Tabela 1- Referência e corrente de curto circuito das células (Konica Minota).

CÉLULAS	CORRENTE CURTO CIRCUITO (I_{SCref})	APLICAÇÃO
AK-100	44,56 mA	Células solares de dupla junção (camada superior a-Si)
AK-110	15,92 mA	Células solares de dupla junção (camada inferior $\mu c - Si$)
AK-120	24,01 mA	Células solares de tripla junção a-Si (camada superior)
AK-130	17,06 mA	Células solares de tripla junção a-Si (camada intermédia)
AK-140	13,18 mA	Células solares de tripla junção (camada inferior)
AK-200	132,32 mA	Células solares de m-Si

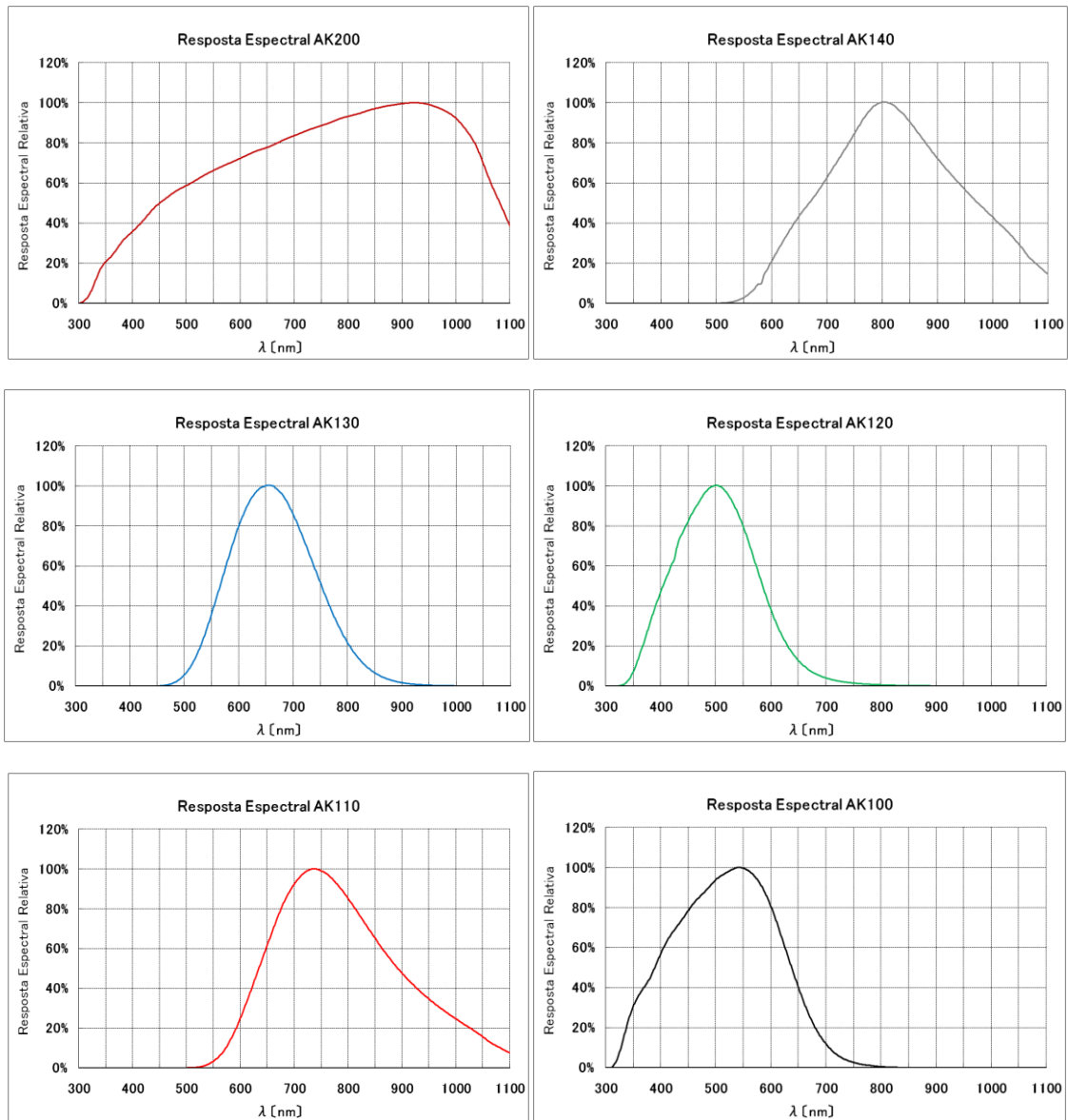


Figura 2 - Respostas espectrais das células de referência AK-200, AK-140, AK-130, AK-120, AK-110 e AK-100 da Konica Minolta.

O simulador solar SunSim 3C, fornecido pela PASAN, membro da Meyer Burger Group, é um sistema composto por 6 partes: túnel, caixas das lâmpadas, fonte de potência, célula de referência. Uma descrição completa deste sistema, incluindo como foi montado o túnel, pode ser encontrada em (Hincapie, C. et al., 2014). Os motivos pela escolha deste simulador são descritos com detalhes em (Souza et al., 2012), mas pode-se citar as características da fonte luminosa, superando todos os requisitos da norma internacional (IEC 60904-9, 2007) sendo classificado como A+A+A+, e cujas características básicas estão apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2 - Classificação do modelo SunSim 3C de acordo com a IEC 60904-9.

NORMA	CLASSE – AAA	SunSim 3C - A+A+A+
Não uniformidade espacial	$\leq 2 \%$	$\leq 1,0\%$
Instabilidade temporal (LTI)	$\leq 2 \%$	$\leq 1,0\%$
Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	$\leq \pm 12,5 \%$

A Fig. 3 apresenta um gráfico do espectro da lâmpada do simulador superposta ao espectro padrão da radiação solar. A curva apresentada foi fornecida pelo fabricante e mostra uma concordância muito boa com o espectro solar.

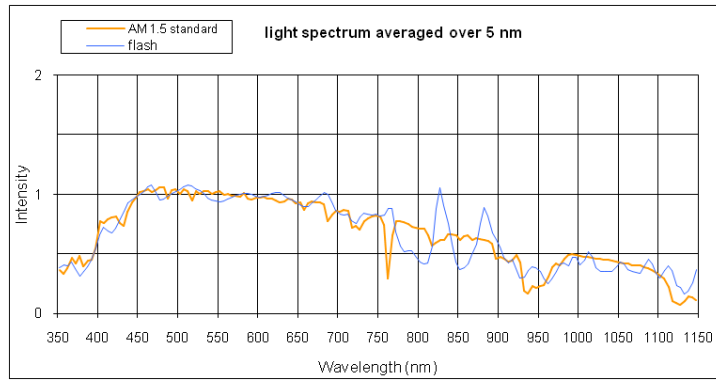


Figura 3 - Espectro de referência e espectro do “flash”, fornecido pelo fabricante.

Para a medição da corrente e tensão foram utilizados multímetros da marca Agilent, modelo 3458A de resolução máxima 8 ½ dígitos, resolução de medida da corrente de 30 μA , memória interna para até 10.240 medidas e modelo 34411A de resolução máxima 6 ½ dígitos, tempo de integração para a medida de tensão DC de 100 μs e capacidade de memória interna de 50.000 leituras.

2.2 Procedimentos teóricos

Como foi visto, para resolver a Eq. (1) são necessárias 4 funções: as distribuições espectrais de referência e da lâmpada e as respostas espectrais das duas células, de referência e sob teste. Por meio da digitalização das funções apresentadas nas Fig. 2 e 3 são obtidas estas funções numéricas. O LABSOL utiliza um programa produzido internamente como ferramenta de interpolação para alinhar vetores, mesmo que sejam de diferentes espaçamentos e, a partir deste, produz o resultado numérico correspondente. Desta forma, foram obtidos os resultados teóricos apresentados na seção 3 deste trabalho.

2.3 Procedimentos experimentais

Basicamente, a metodologia consistiu em medir, simultaneamente, o “flash” do simulador SunSim 3C, na condição padrão de teste (irradiância incidente de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e distribuição espectral da radiação AM 1,5) com a célula de silício cristalino e com o conjunto de células necessárias representativas de cada tecnologia, uma a uma. Os ensaios das células foram realizados nas instalações do laboratório de energia solar da UFRGS. A medida do “flash” foi realizada utilizando os multímetros citados, programados para atuar em máxima velocidade. As medidas de irradiância do simulador são feitas através da célula de referência do simulador e registradas em equipamento de aquisição próprio.

Antes de realizar a aquisição sequencial de dados de corrente ao longo da duração do flash, foram registradas as correntes tomadas em intervalos de 20 μs (utilizando o multímetro Agilent 3458A), o que representa cerca de 500 pontos para cada pulso de flash, pois a duração total é de cerca de 10 ms. Dos pulsos registrados, conforme apresentado na Fig. 4, observou-se que deveriam ser considerados os valores do intervalo de maior estabilidade, de 5500 a 9000 μs . Esta observação inicial demonstrou que seria suficiente utilizar um menor número de pontos para cada observação.

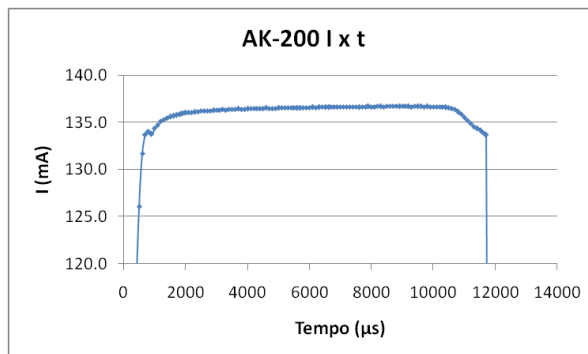


Figura 4 - Corrente ao longo do tempo na célula AK-200 registrada por um multímetro durante exposição ao “flash”. Ampliação no intervalo de 120 a 140 mA do eixo vertical.

As medições da corrente de curto-circuito das células de referência foram então realizadas com multímetros Agilent 34411A, que permitem a utilização do método de gatilho automático (“trigger” level) e o registro em memória interna do instrumento. Com cada célula instalada e o multímetro correspondente programado, ao incidir a luz do “flash” a aquisição de dados inicia-se automaticamente sendo prolongada pelo número de medições pré-programado. Evidentemente, os multímetros nas escalas de corrente têm seus “shunts” internos, mas houve o cuidado de programar os mesmos para não trocarem de escala durante ou entre as medições. Os multímetros utilizados nestas medidas são mais novos que os Agilent 3458A e tem sua certificação de calibração mais recente. Por serem de atuação mais lenta ao medir corrente, o número de pontos adquirido nesta fase foi menor (em torno de 50 medições por pulso do “flash”, com intervalo de 200 μ s), mas suficiente. O perfil de irradiância do “flash” do simulador solar foi sempre semelhante ao apresentado na Fig. 3.

A partir dos dados obtidos para a corrente produzida nas células e da irradiância instantânea do simulador, registrada por uma segunda célula de referência conectada ao sistema do simulador, (modelo CH-2000 Neuchâtel, m-Si, sensibilidade de 134,50 mA), foi possível calcular o erro de descasamento espectral (MM) existente na realização de ensaios de módulos de cada uma das tecnologias referentes às células AK-100, AK-110, AK-120, AK-130 e AK-140 quando se utiliza o simulador SunSim 3C. Da mesma forma, foi feita a medida da célula AK-200, que, em princípio, deveria ter um erro MM=0, mas que serve para avaliar os efeitos combinados de imprecisões experimentais existentes.

As células foram instaladas no plano onde os módulos fotovoltaicos sob teste normalmente recebem a radiação, no mesmo plano onde se encontra a célula de referência CH-2000 do próprio simulador. A Eq. (2), utilizada conforme a norma (IEC 60904-7, 2008) para esse tipo de correção, foi aplicada nos cálculos, onde foram utilizadas as correntes de curto circuito fornecidas pelo fabricante e as correntes obtidas experimentalmente. Cada ensaio foi repetido cinco vezes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados teóricos

Com as curvas digitalizadas e as integrais da Eq. (2) efetuadas, os resultados de MMs teóricos aparecem como valores realmente pequenos. Estes resultados aparecem na Tab. 3. Como a qualidade espectral do simulador através dos dados do fabricante é excepcionalmente boa, apenas nas células de silício amorfo com tripla junção (que envolvem a resposta da AK-130) haveria uma maior preocupação. Este resultado teórico, no entanto, não dá garantias de que o simulador solar esteja reproduzindo exatamente este resultado e, como foi dito nos objetivos do presente trabalho, uma verificação experimental deverá ser produzida.

Tabela 3 – Resultados teóricos do erro de descasamento para as células de referência AK-200, AK-100, AK-110, AK-120, AK-130 e AK-140.

CÉLULA	<i>MISMATCH</i> TEÓRICO MM (%)
AK-200	0,00
AK-100	- 0,21
AK-110	1,00
AK-120	- 0,58
AK-130	2,44
AK-140	- 0,10

3.2 Resultados experimentais

A média e desvio padrão das medidas realizadas para cada célula ensaiada, bem como a $I_{S_{ref}}$ (fornecido pelo fabricante) e o erro de descasamento espectral (MM) estão apresentados na Tab. 4. O valor teórico apresentado na Tab.3 foi repetido na última coluna para facilitar a comparação. Como se pode constatar, o menor valor de MM foi, conforme evidentemente esperado, o da célula AK-200 (m-Si), seguido pelo da célula AK-100, ambos abaixo de 1%. O erro de MM mais elevado, de aproximadamente 6%, foi observado na célula AK-140. As células AK-110, AK-120, e AK-130 apresentaram valores de MM entre 3 e 4%.

Tabela 4 - Valores da média e desvio padrão da corrente medida, corrente de curto circuito e erro de descasamento para as células de referência AK-200, AK-100, AK-110, AK-120, AK-130, AK-140, incluindo o valor teórico.

CÉLULA ENSAIADA	MÉDIA DE CORRENTE (I_{SC})	DESVIO PADRÃO DE CORRENTE	CORRENTE DE REFERÊNCIA (I_{SCref})	MISMATCH EXPERIMENTAL MM(%)	MISMATCH TEÓRICO MM (%)
AK-200	132,1089 (mA)	0,0120 (mA)	132,32 (mA)	0,16	0,00
AK-100	44,8635 (mA)	0,0533 (mA)	44,56 (mA)	- 0,68	- 0,21
AK-110	15,4213 (mA)	0,0048 (mA)	15,92 (mA)	3,23	1,00
AK-120	24,7176 (mA)	0,0386 (mA)	24,01 (mA)	- 2,86	- 0,58
AK-130	17,7535 (mA)	0,0048 (mA)	17,06 (mA)	- 3,91	2,44
AK-140	12,4074 (mA)	0,0148 (mA)	13,18 (mA)	6,23	- 0,10

Dessa forma, para ensaio de módulos da tecnologia de silício amorfo de uma única camada, que também pode ser representada pela célula AK-100, poderia ser utilizada uma célula de referência de m-Si, com erro inferior a 1%, além das demais incertezas inerentes ao procedimento de medidas das curvas características dos módulos. Para o restante das tecnologias referentes às células ensaiadas, inclusive para os módulos de dupla camada por superposição de silício microcristalino sob silício amorfo, existe a necessidade de uso de células de referência da tecnologia correspondente, quando se utilizar o simulador SunSim 3C, ou pelo menos reproduzir uma análise similar a esta, periodicamente, para obter os fatores de correção necessários.

Ao comparar os resultados experimentais com os teóricos verifica-se um valor significativamente maior no caso experimental. Era de esperar-se valores mais altos devido ao aumento de elementos que introduzem incertezas e imprecisões experimentais, ausentes na análise teórica. Existe uma incerteza associada a cada calibração no "Test Report" correspondente a cada célula de referência, esta incerteza é de 1,7%. No entanto, supõe-se que no conjunto de células de mesma origem, com técnicas de calibração do mesmo tipo, as incertezas relativas entre as mesmas sejam bem menores. Desta forma, nos valores com desvios identificados como erros de MM experimentais na Tab. 4 não foram consideradas incertezas experimentais baseadas nas incertezas dos instrumentos e células, os resultados foram apresentados ignorando esta possibilidade. Mas estes erros existem, e tanto é certo que eles interferem que o erro de MM obtido para a célula de referência de silício monocristalino mostra um valor para MM de 0,16% nesta coluna, e este erro não ocorre devido ao espectro, mas a diferenças de calibração e procedimentos experimentais que levam às incertezas de medida. Nesta mesma coluna, os valores abaixo de 1% não podem ser efetivamente considerados como válidos, pois seguramente não é possível afirmar que os erros sejam tão pequenos. Por outro lado, com exceção da célula AK100 que também teve um erro menor que 1%, os outros valores estão demonstrando significativas diferenças que vão muito além das imprecisões experimentais introduzidas na medição. Como consequência entende-se que os dados da curva espectral fornecida pelo fabricante não está em plena conformidade com o espectro real produzido pelo simulador, pelo menos não na sua forma atual. Existe a hipótese deste desvio estar associado ao tempo de utilização do equipamento (em torno de dois anos com mais de 4 mil pulsos de "flash") que pode ter levado a modificações na qualidade espectral das lâmpadas.

4. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, foi estabelecido, com uma boa exatidão, o erro devido ao "mismatch" da distribuição espectral do "flash" do simulador SunSim 3C na realização de ensaios das diferentes tecnologias representadas pelas células de referência ensaiadas. Apesar de os MMs teóricos terem apresentado resultados predominantemente abaixo de 1%, os erros de MM obtidos experimentalmente alcançaram valores entre 3 e 6% para quase todos os casos, somente para as tecnologias de silício amorfo e silício cristalino obteve-se resultados com erro inferior a 1%. Conclui-se então que há necessidade do uso de células de referência representativas da mesma tecnologia do módulo a ser ensaiado ou a realização de ensaios periódicos determinados os desvios devido ao descasamento espectral e possíveis mudanças de comportamento das fontes de luz no simulador ao longo de sua vida.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA

REFERÊNCIAS

Case, M., Owusu. Y.; Chapman, H; Dargan, T; Ruscher, P., 2008 "On the Matter of Proposed new low-latitude Solar Reference Spectra", Renewable Energy, vol.33, 12, pp.2645-2652.

- Gasparin, F. P., Buhler, A. J. e Krenzinger A., 2012.” Análise da Importância do Fator de Descasamento Espectral na Caracterização Elétrica de Módulos Fotovoltaicos”. In: IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Gasparin, F. P., 2009. “Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos”, Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.
- Green, M.A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W.; Dunlop, E.D. Solar cell efficiency tables (version 40). Prog. Photovolt. 2012, 20, 606–614.
- Haag, R. e Krenzinger A., 2008a. “Análise da Influência de Parâmetros Atmosféricos e Locais na Distribuição Espectral da Radiação Solar”. Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis. Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Haag, R. e Krenzinger A., 2008b.”Validação de uma Metodologia para Determinação da Irradiância Espectral Solar utilizando um Radiômetro Espectral”, XIV Congresso Ibérico e IX Congresso Ibero-americano de Energia Solar, Vigo, Espanha.
- Haag, R. e Krenzinger A., 2010. “Estimativa da Distribuição da Irradiância Solar para Distintas Regiões da América do Sul”. Avances em Energias Renováveis y Medio Ambiente, vol. 14, pp. 11.49-11.56.
- Haag, R. 2012, “Estimativa da Distribuição Espectral da Radiação Solar sobre o Território Brasileiro através de Análise Multi-instrumental”. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 2012.
- Hincapie, C.; Picoli, L.; Gasparin, F.; krenzinger, A., “Estudo e Montagem de Túnel para Simulador Solar”, V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 2014.
- H. Stiebig, C. Zahren and U.Rau, “Simple Approach Characterise Thin-film Silicon Tandem Cells Modules, Proc. 25th EU PVSEC/ 5th WCPEC, Valencia, Spain, (2010), pp. 2744-2747.
- IEC 60904-9 ed.2.0, “Photovoltaic devices – Part 9: Solar Simulator Performance Requirements”, (2007).
- IEC 60904-7 ed. 3.0, “Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the Spectral Mismatch Correction for measurements of Photovoltaic devices”, (2008).
- Marion, B., 2010. “Preliminary Investigation of Methods for Correcting for Variations in Solar Spectrum under Clear Skies”. Technical Report, NREL. Golden, CO, USA.
- Report IEA-PVPS T13-02, “Characterisation of Performance of Thin-film Photovoltaic Technologies”, 2014.
- Souza, R. B., Prieb, C. W. M., Krenzinger, A., 2012 Análise De Simuladores Solares Para Ensaio De Módulos Fotovoltaicos IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo.

SPECTRAL QUALIFICATION OF SOLAR SIMULATORS FOR PHOTOVOLTAIC MODULES TESTS

Abstract. *Regard to the distinct spectral response of different technologies of photovoltaic modules, a spectral mismatch rises from the use of crystalline silicon reference cells when testing different spectral response devices. In this context, the quality of the solar simulator is of utmost importance and spectral mismatch factor can not be neglected, and should be studied to precisely define the scope of this variable. The aim of this work is to analyze if the simulator SunSim 3C LABSOL-UFRGS is good enough to perform tests of different photovoltaic technologies without spectral correction. Toward this, a methodology to establish with good accuracy the minimum error due solely to the "mismatch" for each tested technology was followed, in which the flash was simultaneously measured by a crystalline silicon cell as a reference, and a set of cells with spectral sensitivities corresponding to different thin film technologies as the module under testing. Mismatch errors between 1 and 6% were produced for all mentioned technologies. This results lead to conclude there is a need to use same technology reference cells, or to find a way to correct this mismatch for all cases.*

Key words: *Solar Simulator, spectral irradiance, spectral mismatch error*