

ANÁLISE DE SIMULADORES SOLARES PARA ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Rodrigo Buchfink de Souza – rodrigobuchfink@gmail.com

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Laboratório de Energia Solar – PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise comparativa de alguns simuladores solares para módulos fotovoltaicos existentes no mercado, discutindo aspectos como equivalência com o espectro padrão, uniformidade espacial e estabilidade temporal da luz e adequação às necessidades do LABSOL – UFRGS. Neste intuito, foi realizada uma revisão bibliográfica do tema, além de um levantamento de equipamentos semelhantes existentes no Brasil. Também é apresentada uma breve discussão acerca dos pontos positivos e negativos de diferentes tipos de simuladores solares, a qual pode ser útil no momento da escolha do equipamento mais adequado para o uso em laboratórios ou indústrias. O trabalho apresenta também as diretrizes de classificação adotadas pela última versão das normas da Comissão Internacional de Eletrotécnica IEC.

Palavras-chave: Simuladores Solares, Módulos Fotovoltaicos, Energia Solar Fotovoltaica

1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis estão cada vez mais presentes em função, principalmente, por prejudicarem menos o ambiente e serem inesgotáveis. A energia solar fotovoltaica destaca-se neste sentido, pois está disponível em praticamente todo o planeta e pode abranger desde instalações pequenas até grandes usinas com potência de dezenas ou centenas de MW. Esse aspecto justifica o grande investimento por parte de países desenvolvidos, tanto na implementação de sistemas fotovoltaicos, quanto no seu desenvolvimento tecnológico.

1.1 Módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são os componentes que convertem diretamente energia solar em elétrica. A caracterização elétrica dos módulos, feita a partir da análise da sua curva corrente × tensão (Fig. 1), é de grande importância para avaliar sua qualidade e capacidade de desempenho. A determinação experimental da curva $I-V$ é feita sob um conjunto de condições específicas definidas por norma e denominado condição padrão de teste:

- Irradiância incidente: 1000 W/m^2
- Espectro da irradiância incidente: AM1,5G
- Temperatura da célula: $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

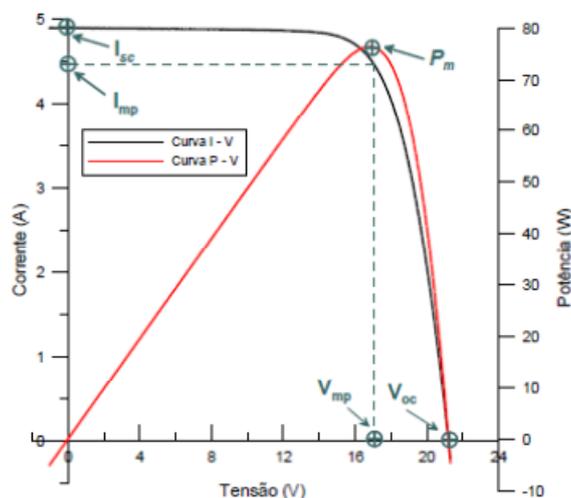


Figura 1 – Curva característica I-V de um módulo fotovoltaico (Bühler, 2011).

Existem muitos outros dados que são necessários para promover uma completa análise do desempenho de um módulo fotovoltaico em operação, como coeficientes de variação de parâmetros com a temperatura, dependência espectral, degradação com a exposição ao sol, características mecânicas e de isolamento elétrica etc., mas a curva característica é a primeira evidência da qualidade de um módulo.

A técnica de medir a curva característica normalmente envolve a utilização de uma fonte que produz uma varredura de tensão no módulo, desde seu ponto de curto-circuito até seu ponto de circuito aberto, e um sistema de aquisição de dados com medidas simultâneas de irradiância, tensão e corrente. O tempo desta varredura é o tempo de medição da curva.

Sempre que possível a medição da curva característica deve ser realizada com exposição do módulo à radiação solar natural, em dias de céu límpido e com alguns cuidados para aproximar as condições de medida à condição padrão. No entanto, para não ser necessário aguardar que estas condições naturais ocorram e para poder produzir ensaios com maior frequência, é aceitável a utilização de sistemas de iluminação artificial nos ensaios de módulos fotovoltaicos, denominados simuladores solares.

A capacidade instalada mundial de sistemas de geração fotovoltaica é, atualmente, de mais de 60 GW. Ainda incipiente no Brasil, espera-se uma grande expansão nos próximos anos, o que potencializa o uso de simuladores solares para a caracterização experimental dos módulos fotovoltaicos utilizados nestes sistemas. Além disso, a partir de julho deste ano, para serem comercializados no país os módulos fotovoltaicos necessitam passar por testes definidos pelo Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO.

2. SIMULADORES SOLARES

Simuladores solares utilizam lâmpadas especiais para emular as propriedades da luz solar durante o ensaio da determinação da curva característica de dispositivos fotovoltaicos. A corrente e tensão do módulo sob teste, além da irradiância e da temperatura de célula são medidos e registrados através de aparato eletrônico específico.

2.1 Tipos

Há três tipos básicos de simuladores, diferenciados pela tecnologia usada para a geração da luz:

- Iluminação contínua;
- Iluminação pulsada (pulso único);
- Iluminação multi-pulso.

Iluminação contínua. Os simuladores de iluminação contínua utilizam uma fonte de luz constante que permite a medida de curvas *I-V* de forma lenta e metódica. O sistema de iluminação deve ser alimentado por corrente contínua muito bem estabilizada. Pelo alto consumo de energia requerido quando se deseja medir a eficiência de módulos de grandes dimensões e por necessitarem de um sistema de resfriamento para manter o módulo ensaiado a uma temperatura adequada, estes sistemas são geralmente utilizados apenas em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento.

Iluminação pulsada. As curvas *I-V* são determinadas durante a emissão de um único pulso de luz com duração de alguns milissegundos (tipicamente 2 a 20 ms). A iluminação pulsada tem algumas vantagens ao testar módulos: o módulo não é significativamente aquecido e o consumo de energia da lâmpada é relativamente baixo. Por outro lado, este método exige um sistema de medida com uma taxa de aquisição bastante alta, capaz de adquirir a curva completa durante o platô do pulso (região em que a irradiância é constante) para não incorrer em erros. Alguns simuladores permitem alterar a intensidade de luz do pulso para medidas em diferentes níveis de irradiação. É atualmente o tipo de simulador solar dominante no mercado.

Iluminação multi-pulso. Estes simuladores emitem uma sequência de *flashes* muito rápidos, durante os quais é medido apenas um ponto da curva por pulso de luz. Esta tecnologia é considerada a menos precisa dos simuladores solares e apenas alguns fabricantes continuam oferecendo estes equipamentos

Obviamente, o principal elemento determinante da qualidade de um simulador solar é a fonte luminosa. Os fabricantes de simuladores utilizam uma variedade de lâmpadas, incluindo de xenônio, de iodetos metálicos, descarga de vapor de sódio e halógenas, sendo que as lâmpadas de xenônio de alta pressão, por emitirem luz com um espectro bastante parecido ao da luz solar, são as mais utilizadas (Photon, 2008).

Sistemas com iluminação pulsada têm vida útil da lâmpada tipicamente entre 40 mil a um milhão de *flashes*. Os sistemas contínuos têm uma vida útil da lâmpada em torno de 1000 horas de operação contínua. Se for considerada uma avaliação mais criteriosa, tendo em vista estes valores, um milhão de *flashes* significa mais tempo de uso que 1000 horas.

A maioria dos sistemas pulsado têm tipicamente uma duração de *flash* de 2 a 20 ms, o que significa que o sistema de medição deve ser capaz de adquirir os dados da curva dentro deste período, o que pode resultar em uma curva *I-V* com menos pontos. Isto também implica que o módulo a ser ensaiado deve ser capaz de responder à luz neste curto período de tempo, sendo, portanto, importante saber o tempo de resposta do dispositivo a ser testado.

Como referido anteriormente, ao contrário do que ocorre nos simuladores com iluminação contínua, o uso de sistemas com luz pulsada apresenta a vantagem de não provocar um aumento apreciável de temperatura do módulo. Testes têm mostrado que para módulos com células monocristalinas ou multicristalinas, independentemente da espessura da célula, não há influência significativa da taxa de calor observada quando o módulo é exposto à luz durante, no máximo, 500 ms. Como um teste típico leva menos tempo, chegando a 20 ms (Gasparin, 2009), esta vantagem é evidente e poderia ser mantida mesmo para simuladores que viessem a ter pulsos de maior duração para ensaios mais lentos (entre 50 e 200 ms).

Quase todos os simuladores usam lâmpadas de xenônio. Embora hajam alguns desvios devido à alta intensidade das linhas espectrais na faixa do infravermelho próximo do espectro da luz, é ainda possível atingir um excelente desempenho global. Pode-se atingir um espectro melhor no vermelho e no infravermelho usando uma combinação de lâmpadas de xenônio e halógenas. A correção das medidas influenciadas por erros de descasamento espectral é muito importante, mas esta importância poderia ser minimizada com uso de células de referência com a mesma resposta espectral do dispositivo sob teste.

A maioria dos dispositivos encontrados no mercado é ainda de iluminação pulsada. Apesar disso, nos últimos anos elevou-se o número de simuladores com iluminação contínua destinados a testes de *light-soaking* (envelhecimento) de módulos com tecnologia de filmes finos. A Fig. 2 mostra os tipos básicos de simuladores solares.

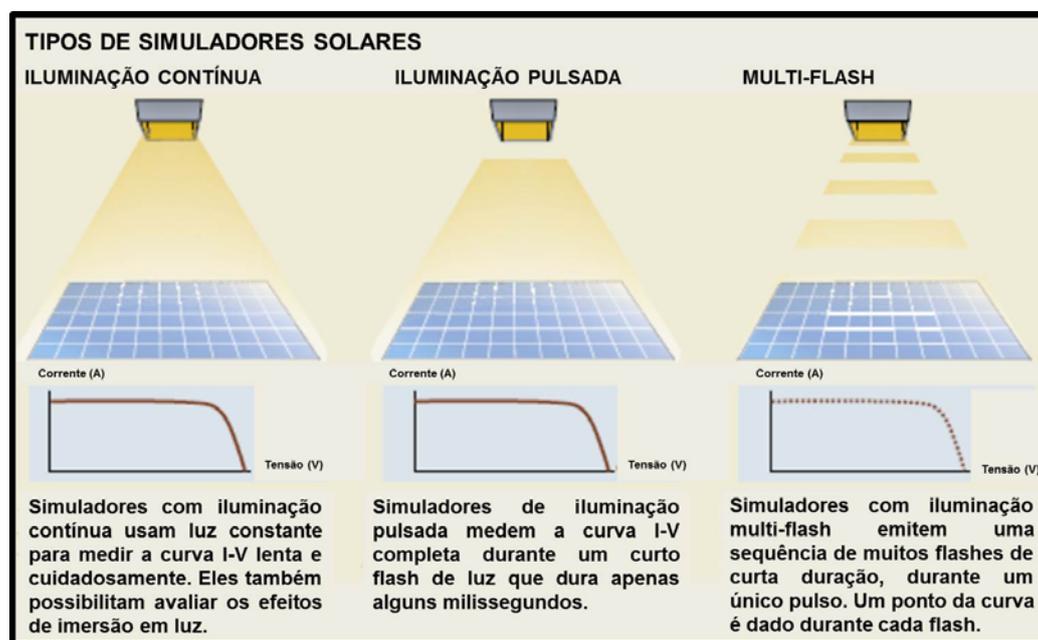


Figura 2 - Tipos de simuladores solares. Adaptado de Photon, 2009.

2.2 Classificação segundo a norma IEC 60904-9

Em outubro de 2007, a International Electrotechnical Commission (IEC) publicou a segunda edição da norma internacional de requisitos de desempenho de simuladores solares (IEC 60904-9 ed. 2), substituindo a primeira edição, publicada em 1995.

Esta última versão da 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. Na norma antiga, o equipamento recebia uma nota global, que refletia a menor nota recebida nas três categorias. Por exemplo, um equipamento que recebeu nota A para casamento espectral e uniformidade espectral, mas apenas nota C para instabilidade temporal, receberia uma nota global C. A nomenclatura foi mudada na segunda edição. A nova classificação global de simuladores solares é mais clara, pois contém as classificações das três categorias. A primeira letra é a classificação dada para o casamento espectral, a segunda para a não-uniformidade espacial e a terceira para a instabilidade temporal. De acordo com a nova classificação, o equipamento descrito no exemplo seria AAC.

Casamento espectral. A quantidade e a qualidade espectral de radiação solar recebida no solo são dependentes de vários fatores, tais como a altitude, composição da atmosfera, a hora do dia e a época do ano. Estes fatores estão relacionados à distância óptica que a radiação solar tem de atravessar para chegar à superfície da Terra. A massa de ar foi padronizada para AM0 (radiação solar extraterrestre), AM1D (Direta), AM1G (Global), AM1.5D, AM1.5G, AM2D e AM2G sendo que, para a maioria das aplicações terrestres, AM1.5G é considerado o espectro solar padrão. Este espectro é definido por normas internacionais e está apresentado na Fig. 3 entre os comprimentos de onda de 400 nm e 1100 nm.

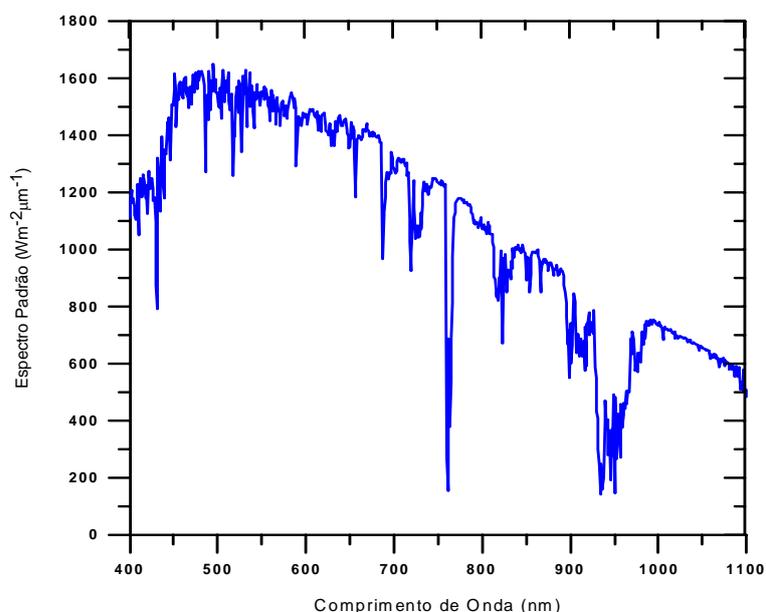


Figura 3 - Espectro padrão para AM 1.5G entre 400 nm e 1100 nm. Fonte: NREL, 2012.

A classificação dos simuladores solares em relação ao casamento espectral refere-se à razão entre as integrais do espectro padrão e do espectro dado pelo simulador, em uma determinada faixa de comprimentos de onda. A classe será dada de acordo com o pior resultado, considerando os seis intervalos de comprimento de onda de interesse. A Tab. 1 mostra estes intervalos, com os seus respectivos percentuais de irradiância em relação ao espectro padrão.

Tabela 1 - Distribuição da irradiância espectral padrão (IEC, 2007).

	Faixa de comprimento de onda [nm]	Percentual da irradiância total na faixa de comprimento de onda (400 nm – 1100 nm)
1	400 – 500	18,4%
2	500 – 600	19,9%
3	600 – 700	18,4%
4	700 – 800	14,9%
5	800 – 900	12,5%
6	900 - 1100	15,9%

Por exemplo, se um simulador apresentar, na faixa entre 500 e 600 nm de comprimento de onda, uma razão entre as irradiâncias de $\pm 25\%$, ou seja, de 0,75 (espectro do simulador mais intenso que o padrão) a 1,25 (espectro padrão mais intenso), ele é classificado como A. A nota final é dada pela menor nota ao longo de todas as faixas de comprimento de onda. Por exemplo, se na faixa de 800 a 900 nm a razão estiver em 30%, o que representaria classe B, o simulador é então classificado frente ao casamento espectral como B.

- Classe A ($\pm 25\%$) tem a correspondência mais próxima do espectro do Sol;
- Classe B ($\pm 40\%$);
- Classe C (+100 / -60%).

Geralmente, quanto mais próximo do espectro solar for o espectro do equipamento, mais caro é o simulador solar.

Intensidade do feixe de luz. As normas internacionais definiram a intensidade da luz para um simulador solar com o filtro de AM1.5G de 1000 W/m^2 . Este nível de intensidade é referido como "um sol". A menos que uma determinada aplicação requeira testes em condições de mais do que um sol, com lâmpadas de alta potência, o simulador solar poderá realizar esta tarefa em pequenos alvos e estes deverão ser afastados da fonte de luz. Isto pode resultar em uma colimação deficiente e, conseqüentemente, em não-uniformidade do feixe de luz. Assim, na escolha de um simulador solar deve-se verificar qual o módulo de maior tamanho a ser testado e, em seguida, selecionar o sistema que tenha um feixe de luz compatível com tal tamanho.

Não-uniformidade. Esta característica refere-se à distribuição espacial da luz sobre a área iluminada. Em simuladores solares, esta é uma das características mais difíceis de satisfazer, pois a radiação solar é muito uniforme. A IEC 60904-9 especifica a não-uniformidade máxima para cada classe:

- Classe A (2%);
- Classe B (5%);
- Classe C (10%).

O cálculo é realizado segundo a Eq. (1).

$$\text{Não – uniformidade [\%]} = \left(\frac{\text{MAX}_{\text{irradiância}} - \text{MIN}_{\text{irradiância}}}{\text{MAX}_{\text{irradiância}} + \text{MIN}_{\text{irradiância}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

onde a máxima e a mínima irradiância são medidas em uma dada área de teste.

Além disso, para especificar a tolerância de não uniformidade, a norma ASTM E927 também especifica o procedimento, a área do detector, o número de posições e os seus locais de medição e cálculo da não-uniformidade.

Instabilidade Temporal. Esta característica é uma medida da estabilidade da intensidade do feixe de luz ao longo de um período de tempo. A norma IEC 60904-9 dividiu a instabilidade temporal em instabilidade de irradiação de curto e de longo prazo (STI – *Short-term Instability of Irradiance* e LTI – *Long-term Instability of Irradiance*). A STI descreve a flutuação de um ponto único da curva *I-V* durante a medida, enquanto que a LTI descreve a instabilidade da irradiância entre diferentes pares da curva *I-V*. Não é necessariamente ruim se os valores de LTI sejam classificados como classe C, mas é muito difícil conduzir medidas precisas se STI não for classe A. Assim, têm-se as seguintes instabilidades máximas para cada classe:

- Classe A (2%);
- Classe B (5%);
- Classe C (10%).

O cálculo é realizado segundo a Eq. (2):

$$\text{Instabilidade Temporal [\%]} = \left(\frac{\text{MAX}_{\text{irradiância}} - \text{MIN}_{\text{irradiância}}}{\text{MAX}_{\text{irradiância}} + \text{MIN}_{\text{irradiância}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

onde a máxima e a mínima irradiância dependem da aplicação do simulador solar.

3. SIMULADORES SOLARES EXISTENTES NO BRASIL

No Brasil existem alguns poucos simuladores solares destinados ao ensaio de módulos fotovoltaicos, em sua maioria localizados em universidades ou centros de pesquisa.

O Núcleo de Tecnologia em Energia Solar da Universidade Católica do Rio Grande do Sul (NT-Solar PUCRS), em Porto Alegre, possui um simulador da marca Berger Lichttechnik, modelo PSS8, de fabricação alemã e classificação AAA. Este simulador de luz pulsada (pulso único de 10 ms) tem o nível de irradiância controlável entre 500 e 1100 W/m², fornecendo uma área iluminada útil com diâmetro de até 2,4 m. O NT-Solar possui também um simulador para células fotovoltaicas, de fabricação própria.

No Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (LSF-IEE/USP), na cidade de São Paulo, funciona um simulador para módulos fotovoltaicos da marca OptoSolar, modelo SOL 20x20, classe AAA, irradiância controlável entre de 200 e 1100 W/m² também fabricado na Alemanha.

No Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em São José dos Campos, estão instalados um simulador para a radiação extraterrestre (AM0) e também outro simulador, desenvolvido no próprio INPE, mas apenas para células fotovoltaicas, o SOLSIM, modelo AM15x100.

No CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica da Eletrobrás, no Rio de Janeiro, existe um simulador fornecido, na época da aquisição, pela empresa canadense Newsun Technologies. O modelo é o XE 1590, de iluminação multi-pulsos (lâmpada de xenônio), com espectro AM1.5, irradiância controlável entre de 700 e 1200 W/m² e área de teste de 1,0 m x 1,6 m. O fornecedor original, entretanto, encerrou suas atividades, sendo sua tecnologia absorvida pela também canadense Spectra Nova, a qual, aparentemente, também retirou-se do mercado. Em função destas dificuldades, o equipamento não está operando atualmente.

Finalmente, na empresa Tecnometal, localizada em Campinas e atualmente a única indústria brasileira que produz módulos fotovoltaicos, tem instalado um simulador da marca Spire, modelo SPI-SUN 4600SLP, de iluminação multi-pulso, classe AAA, com espectro solar AM1.5, irradiância controlável na faixa de 200 a 1100 W/m² e área de teste de 200 cm x 137 cm.

4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DO SIMULADOR DO LABSOL - UFRGS

Há alguns anos, surgiu a possibilidade do LABSOL-UFRGS adquirir um simulador solar para módulos fotovoltaicos. A partir de uma análise dos modelos existentes no mercado, experiências relatadas por pesquisadores da área e da disponibilidade financeira dentro do projeto de suporte, a escolha recaiu sobre o modelo SunSim 3c, fabricado pela empresa suíça Pasan, mostrado na Fig. 4.

Foram levados em conta aspectos como o custo, a área iluminada de 2,0 x 2,0 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, conforme comparação apresentada na Tab. 2. A Fig. 5 mostra as curvas de irradiância padrão e da lâmpada do simulador sobrepostas. É possível observar a

excelente correlação entre as curvas, comprovando a qualidade espectral da lâmpada do equipamento. Sua carga eletrônica de três quadrantes é capaz de polarizar módulos com correntes de até 30 A e tensões de até 300 V. A lâmpada tem garantia de um mínimo de 10000 pulsos e uma vida típica entre 15000 e 20000 pulsos. O sistema de aquisição é capaz de coletar até 4000 pontos da curva *I-V*, a uma resolução de 12 bits. O equipamento encontra-se depositado nas dependências do LABSOL-UFRGS aguardando a conclusão do prédio que abrigará o simulador solar e o túnel colimador.



Figura 4 - Simulador solar Pasan SunSim 3c.

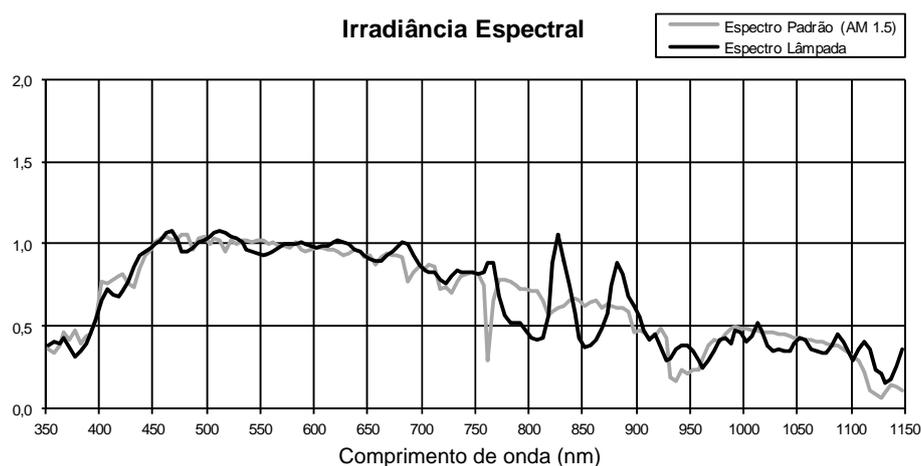


Figura 5 - Comparação entre os espectros padrão e da lâmpada do simulador SunSim 3c (fornecido pelo fabricante).

Tabela 2 - Classificação do modelo SumSim 3c frente à norma IEC60904-9 (dados do fabricante).

Norma	Classe A	SunSim3C
Não-uniformidade espacial	≤ 2 %	≤ 1,0%
Instabilidade temporal (LTI)	≤ 2 %	≤ 1,0%
Casamento espectral	≤ ± 25%	≤ ± 12,5 %

5. CONCLUSÕES

Foi realizada uma análise comparativa, a partir de dados da literatura, de alguns simuladores solares para ensaio de módulos fotovoltaicos, com o objetivo de escolher um simulador solar a ser adquirido para uso no LABSOL-UFRGS. O estudo envolveu observar as classificações dadas pelas normas e sua evolução. A decisão mostrou-se complexa, dado o número de características a serem observadas. Conclui-se que é importante examinar criteriosamente cada uma das características destes equipamentos, pois sistemas que tenham um desempenho deficiente em alguns itens podem prejudicar a validade dos ensaios.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq e à FINEP (programa CT-INFRA) pelo auxílio financeiro. O LABSOL é associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- NREL 2012 Tabela da Irradiância Solar Espectral segundo padrão da ASTM G173 obtido a partir do site <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html> acessado em 23 de abril de 2012.
- 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.
- Gasparin, F. P., 2009. Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- IEC, 2007. Norma IEC 60904-9 Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements, International Electrotechnical Commission.
- Photon, 2008. Photon International Magazine, ed. 06/2008, pp. 186-210.

ANALYSIS OF SOLAR SIMULATORS FOR TESTING OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract: *This paper presents an analysis of solar simulators available on the market, discussing issues such as equivalence with the standard reference spectrum, spatial uniformity and temporal stability of the light and the adequacy to the needs of LABSOL – UFRGS. Thus, a review in the specialized literature was performed as well as a survey of similar equipment existing in Brazil. A brief discussion about the strengths and weaknesses of solar simulators for photovoltaic modules is also presented, which can be useful at the moment of choosing the best equipment for use in laboratories or industries. The paper also presents guidelines for the classification adopted by the latest version of the standards of International Electrotechnical Commission IEC.*

Keywords: *Solar Simulators, Photovoltaic Modules, Photovoltaic Energy*