

# DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR SOLAR PARA EXPOSIÇÃO CONTINUA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Eurides Ramos Costa – didircosta@gmail.com

Fernando Schuck de Oliveira – fernandoschuck@hotmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

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

**Resumo.** Há várias tecnologias de módulos fotovoltaicos que apresentam variação de eficiência depois de um período de exposição à radiação solar. A utilização da radiação solar natural é problemática, pois há variações de intensidade de exposição em dias nublados ou chuvosos e a intermitência entre dia e noite. Neste caso considerar simuladores solares para a exposição prévia de módulos fotovoltaicos pode levar a uma alternativa interessante. A fonte de irradiância é a componente mais importante dos simuladores solares utilizados nos testes de módulos fotovoltaicos. Para teste de exposição sob radiação contínua, é necessária uma câmara de exposição sob iluminação artificial com aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância. Este trabalho focaliza a adequação do espectro de saída do simulador ao de referência da distribuição espectral da radiação solar no espectro visível AM1,5G conforme definido na norma IEC 60904-3. O objetivo é alcançar a Concordância Espectral Classe C como definida na norma internacional (IEC 60904-9, 2007). Neste estudo sobre um simulador solar com dimensões de 1,6 m x 2 m x 2 m (altura x largura x profundidade), 12 (4x3) lâmpadas de vapor metálico PHILIPS HPI-400 W foram selecionadas como fonte de luz e obteve-se irradiâncias correspondentes a, aproximadamente, 200 W/m<sup>2</sup>. Para se atingir o objetivo de aproximar dos 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância incidente no plano de teste da câmara de exposição em estudo, uma possibilidade seria a utilização de lâmpadas HPI-2000 W.

**Palavras-chave:** Simulador solar, módulo fotovoltaico, fonte de irradiância

## 1. INTRODUÇÃO

O módulo fotovoltaico é muitas vezes considerado o componente mais confiável de um sistema fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos são dispositivos com projetos simples e duráveis que exigem pouca manutenção e convertem a radiação solar diretamente em energia elétrica. O mercado de módulos fotovoltaicos cresceu de menos de 1GWp em capacidade fotovoltaica instalada em 2003 para 75 GWp em 2016 e a capacidade fotovoltaica acumulada instalada no mundo totalizou 320 GWp (Fraunhofer ISE, 2017).

Para avaliar as características de desempenho, os módulos fotovoltaicos são classificados sob as chamadas Condições Padrão de Teste (STC), correspondentes a uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, um espectro AM (massa de ar) 1,5 e uma temperatura do dispositivo de 25 °C (Kenny *et al.*, 2013). A medição da curva característica *I-V* é realizada sob a radiação solar natural (*outdoor*) ou em um ambiente de laboratório fechado (*indoor*) com ajuda de um simulador solar (Droz *et al.*, 2008). A medição *outdoor* não é preferível devido à dependência de fatores como a intensidade e a distribuição espectral da radiação solar com a localização geográfica, composição da atmosfera, tempo, dia do ano, variação de altitude e condições climáticas (Guechi e Chegaar, 2007). Os simuladores solares são dispositivos que fornecem características espectral e óptica semelhante ao espectro padrão AM 1,5. Atualmente, à medida que o uso de recursos de energias renováveis vem aumentando, é importante para o mercado fotovoltaico que os testes sejam realizados, devido à existência de dispositivos fotovoltaicos com baixa eficiência (Kohraku e Kurokawa, 2006).

Um simulador solar consiste principalmente em três partes; fonte de iluminação e energia, um filtro óptico para alterar propriedades do feixe e cumprir os requisitos indicados pela norma específica, além de elementos de controle para operar o simulador (Ferrer *et al.*, 2012). Em um trabalho recente sobre fontes de irradiância de simuladores solares para dispositivos fotovoltaicos, Vedat Esen *et al.* (2017) investigaram simuladores solares de acordo com a literatura e classificados com base em fontes de irradiância, história e desenvolvimento tecnológico. No âmbito do mesmo estudo vários tipos de lâmpadas foram investigados. Além disso, demonstram os estudos que utilizaram modelos de simuladores solares para testes de módulos fotovoltaicos e as diferentes maneiras pelas quais as fontes de irradiância foram usadas até hoje.

As lâmpadas de vapor metálico são comumente usadas na iluminação geral e são selecionadas como fontes de irradiância em simuladores solares em vez de lâmpadas xenônio que têm alto consumo de energia, altos custos de controle eletrônico e ciclos de vida curtos (Ekman, Brooks e Rahmdhani, 2015; Novickovas *et al.*, 2015). O seu uso é vantajoso por causa de sua alta eficiência de iluminação de mais de 90 lm/W, bom equilíbrio em qualidades espectrais, correspondência muito próxima da radiação solar, bem como tempo de vida prolongado (> 1000 horas) e custo relativamente baixo (Beeson *et al.*, 1978). Segundo Matson *et al.* (1984), porém, a desvantagem principal das lâmpadas

de vapor metálico é sua baixa qualidade de colimação, o que limita sua aplicação na área onde exige-se requisitos de alta colimação, como simuladores solares de alta concentração e simulador solar para testes *I-V* padrão. As lâmpadas de vapor metálico, portanto, são usadas principalmente na aplicação de simulação solar que permite a luz não colimada, como simuladores solares de teste de módulo e alguns simuladores de testes fotovoltaicos que só precisam de iluminação constante de área grande e características espectrais menos exatas (Matson *et al.*, 1984). No projeto de simulador solar de baixo custo e fluxo intenso de irradiância de Codd *et al.* (2010), foram utilizadas lâmpadas de vapores metálicos de 1500 W e obteve-se apenas 5 % da irradiância, com uma potência de 7x1500 W de lâmpadas. Recentemente em estudos realizados por Pernpeintner *et al.* (2015), Kim *et al.* (2016) e Sabahi *et al.* (2016) lâmpadas de vapores metálicos também foram utilizadas.

O simulador solar baseado em luminárias de vapor metálico apresentado neste artigo para fins de exposição contínua de módulos fotovoltaicos, é capaz de determinar a característica *I-V* de um módulo solar e de simular efetivamente o estado de exposição à radiação solar com a temperatura controlada. Em função do fato de várias tecnologias de módulos fotovoltaicos apresentarem variação de eficiência depois de um período de exposição à radiação solar, considerar este tipo de simuladores solares para a exposição prévia de módulos fotovoltaicos pode levar a uma alternativa interessante. A temperatura do plano de ensaio também pode ser controlada por um sistema de ventilação e renovação de ar do ambiente externo em função da carga térmica do volume da câmara de exposição e da densidade de potência do sistema de iluminação do simulador integrado a câmara.

### 1.1 Classes de simuladores solares para dispositivos fotovoltaicos

De acordo com a norma IEC 60904 (2002), os desempenhos de simulação de simuladores solares são definidos em três classes: Classe A, Classe B e Classe C. Esta classificação é determinada por três critérios principais: correspondência espectral, não uniformidade espacial da irradiância e da estabilidade temporal. De acordo com esses critérios, a classe mais alta é declarada como Classe A e a classe mais baixa como Classe C. Esses critérios são mostrados na Tab. 1.

Tabela 1 - Classificação de um simulador solar, segundo IEC 60904 (2002).

Característica	Classe A	Classe B	Classe C
Equivalência com espectro padrão	0,75 – 1,25	0,6 – 1,4	0,4 – 2,0
Não-uniformidade	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
Estabilidade Temporal	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$

Existem padrões internacionais para avaliar as características da irradiância do simulador. A correspondência espectral é importante para fornecer uma correspondência individual de situações do mundo real e condições de teste. Assim, para efeito de classificação do espectro, neste sistema deve se adequar o espectro de saída do simulador ao de referência da distribuição espectral da irradiância solar no espectro visível AM1,5G, conforme definido na norma IEC 60904-3 e 904-9. Para medir a correspondência espectral, a região de 400 nm - 1100 nm é dividida em seis bandas de comprimento de onda. Cada uma dessas faixas contém uma percentagem específica da irradiância total integrada, conforme especificado no padrão IEC 60904-3 apresentado na Tab.2. A diferença entre as intensidades integradas é tipicamente dentro de alguns valores percentuais, sendo de 10 % o desvio máximo.

Tabela 2 - Referência para comparação da distribuição espectral do simulador solar, segundo IEC 60904 (2002).

Intervalo de comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Percentagem da irradiância total (%)
0,4 a 0,5	18,4
0,5 a 0,6	19,9
0,6 a 0,7	18,4
0,7 a 0,8	14,9
0,8 a 0,9	12,5
0,9 a 1,1	15,9

O nível de correspondência do espectro da fonte de irradiância com o espectro padrão (AM1,5G) é um parâmetro importante na quantificação da qualidade do simulador solar. De acordo com Mohan *et al.* (2014), a correspondência espectral (*SM*) é calculada como a proporção da percentagem real de irradiância que cai no intervalo de interesse e a percentagem de irradiância requerida conforme a Eq. (1).

$$SM = \frac{\text{Percentagem de irradiância real}}{\text{Percentagem de irradiância requerida}} \quad (1)$$

A correspondência espectral do sistema de simulador solar é o pior caso entre todos os intervalos. Com base no valor de correspondência espectral obtido a partir da Eq.(1), o simulador solar pode ser classificado como classe A, B

ou C em correspondência espectral. O critério de correspondência espectral é independente da forma do espectro no intervalo de comprimento de onda.

A não uniformidade espacial (*SNU*) refere-se à distribuição espacial da luz sobre a área iluminada. Em simuladores solares, especialmente nos com grandes áreas de superfícies, esta é uma das características mais difíceis de satisfazer, pois a radiação solar é muito uniforme. A *SNU* é calculada através da Eq. (2) onde  $E_{max}$  é a intensidade máxima e  $E_{min}$  é a intensidade mínima especificada na seção de teste dada.

$$SNU = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times 100\% \quad (2)$$

A estabilidade temporal é uma medida da estabilidade da intensidade do feixe de luz ao longo de um período de tempo. De acordo com a norma IEC 60904, a estabilidade temporal da irradiância é calculada de forma semelhante à (*SNU*), mas com “*E*” medida em um ponto particular no plano de ensaio durante o intervalo de tempo de aquisição de dados.

## 1.2 Cálculo teórico do sistema de iluminação

Através da Eq. (3), após a escolha da luminária e da lâmpada adequada e definido os fatores de depreciação e de utilização da lâmpada, é calculada a quantidade de luminárias, necessário para se chegar à iluminância média ( $E_m$ ) (PROCEL, 2011).

$$n = \frac{E_m \cdot A \cdot F_d}{\phi \cdot \eta_L \cdot \eta_R} \quad (3)$$

onde:  $n$  é a quantidade de lâmpadas;  $E_m$  a iluminância média (ABNT5413, 1982);  $A$  área de trabalho em  $m^2$ ;  $F_d$  o fator de depreciação (varia de 1,25 a 1,67),  $\phi$  o fluxo luminoso da lâmpada (conforme catálogos);  $\eta_L$  a eficiência da luminária (dado dos fabricantes) e  $\eta_R$  a eficiência do recinto (vide tabelas). Para tanto, previamente, tem-se as seguintes etapas de cálculo:

- Índice do local ( $K$ ) que é calculado de acordo com as dimensões do local de teste e a Eq.(4);

$$k = \frac{C \cdot L}{[h \cdot (C + L)]} \quad (4)$$

- Fator de utilização ( $F_u$ ) é escolhido após o conhecimento das refletâncias (tabela de fabricante de luminária) do teto, parede e piso, além do índice local  $K$  calculado;
- Fator de depreciação ( $F_d$ ) (poeiras nas luminárias e depreciação das lâmpadas);
- Nível de iluminância projetada para o ambiente (ABNT-ISO/CIE 8995-1, 2013).

A distribuição da não uniformidade sobre o plano de ensaio é avaliada para o simulador solar com luminária definida. Os pontos de iluminação devem preferencialmente ser distribuídos uniformemente no recinto, levando-se em conta os contornos do plano de ensaio, o direcionamento da luz e o próprio tamanho da luminária. Assim, a iluminância ( $E$ ) em um ponto é o somatório de todas as iluminâncias incidentes sobre esse ponto oriundas de diferentes pontos de luz expressada pela Eq. (5):

$$E = \frac{I_i}{h^2} + \sum \left( \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} \right) \quad (5)$$

onde  $I_\alpha$  é determinada com o auxílio do diagrama de distribuição de intensidades luminosas (*CDL*) da luminária escolhida. Na determinação de  $I_\alpha$  é necessário multiplicar-se o valor encontrado na *CDL*, em função do ângulo de inclinação, pelo fluxo luminoso da lâmpada em questão e dividir o resultado por 1000 lm (para uniformizar).

## 2. METODOLOGIA

A obtenção da estabilidade do desempenho de um módulo de filme fino antes de teste de conformidade consiste em uma tarefa difícil de realizar em condições “outdoor”. Para facilitar o controle do tempo de exposição sob irradiância luminosa e o controle da temperatura dos módulos nos ensaios de estabilização, uma câmara climatizada em estrutura metálica será instalada nas dependências do LABSOL. Trata-se de uma câmara com volume de 20  $m^3$ , onde a temperatura interna será controlada por um sistema de ventilação e renovação de ar do ambiente externo em função da carga térmica do volume da câmara e da densidade de potência do sistema de iluminação de um simulador solar de classe C integrado a câmara. Na parte superior da câmara, permanecerá em uma estrutura retangular em perfis de alumínio, uma fonte de radiação luminosa artificial equipada com luminárias e acessórios que disponibilizará aproximadamente 1000  $W/m^2$  de irradiância simulada para um plano de ensaio, quadrado, com 2 m de lado. Os módulos serão fixados em um suporte regulável sob o plano de ensaio na parte interna da câmara, permitindo ajuste de

posicionamento com relação ao sistema de iluminação. A Fig. 1 apresenta as dimensões (não estão em escala) da câmara de exposição e indicação de posição do plano de ensaio para módulos FV e da estrutura suporte das luminárias.

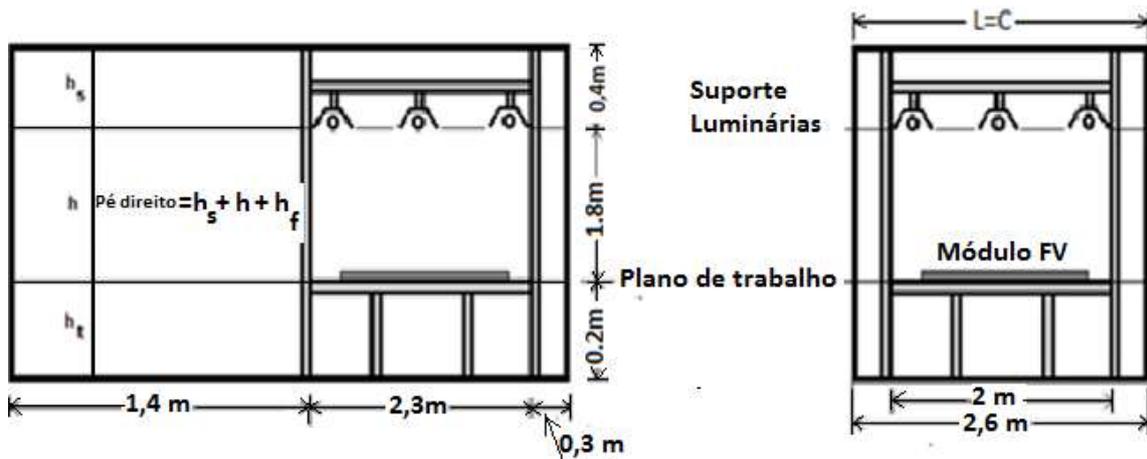


Figura 1- Dimensões da Câmara de exposição e indicação de posição do plano de ensaio para módulos FV e da estrutura suporte das luminárias.

## 2.1 Dimensionamento do sistema de iluminação da câmara de exposição à radiação

Para atingir os critérios de correspondência espectral, caracterização da distribuição da irradiância e estabilidade temporal do sistema de iluminação de um simulador solar equivalente à classificação classe C especificada na Tab. 1, adotar-se-á a seguinte metodologia: determinação dos objetivos da irradiância e efeitos a alcançar, caracterização do ambiente, análise dos fatores de influência na qualidade da irradiância, cálculo da irradiância geral, adequação dos resultados ao projeto, cálculo de controle da melhor distribuição das luminárias, classificação espectral, definição dos pontos de iluminação para efeito de caracterização da distribuição da irradiância, avaliação do consumo energético e caracterização da estabilidade temporal.

Para efeito de validação teórica do número e distribuição de luminárias e a uniformidade de distribuição da irradiância no plano de ensaio foi utilizado o software DIALux 4.11 (2017), que é uma ferramenta computacional de cálculo luminotécnico em que um modelo matemático trabalha com os parâmetros dimensionais e de ambiente estabelecidos na Fig. 1 e os dados encontrados nos catálogos fornecidos pelos fabricantes de luminárias (arquivos fotométricos em formato padrão IES). O programa permite visualizar os seguintes resultados: folha de dados da luminária que contém a curva fotométrica juntamente com muitos dados, resumo que contém a planta com as curvas isolux, intensidades médias em plano de trabalho, piso, lista de luminárias, etc., resultados luminotécnicos de iluminâncias, uniformidade, potência luminosa.

## 2.2 Procedimentos experimentais

Os ensaios foram realizados nas instalações do laboratório de energia solar da UFRGS. Para avaliar a estabilidade temporal da luminária utilizada foi empregada uma célula de referência de silício, cuja resposta é dada em corrente. Para a não uniformidade de distribuição da irradiância, outra célula de referência de silício (área de 0,28 m x 0,28 m) foi utilizada, porém polarizada eletricamente próximo à sua região de curto circuito através de um resistor de resistência baixa, cuja calibração fornece 128,9 mV/kW·m<sup>2</sup>. As medidas foram realizadas por dois multímetros de 6 ½ dígitos modelo HP34401A, fabricados pela Hewlett Packard.

Para medir o espectro da lâmpada foram utilizados uma esfera integradora, um radiômetro EPP2000 e um programa compatível com o espectro radiômetro EPP2000. Para aferir a estabilidade temporal da luminária a corrente de uma célula solar é monitorada através de um multímetro. A quantificação do espectro da lâmpada e a sua classificação em relação ao casamento espectral são calculada e referenciada através da Eq. (1) e a Tab. 2, respectivamente.

A distribuição da não uniformidade sobre o plano de ensaio é avaliada para o simulador solar com luminária retangular e lâmpada de vapor metálico PHILIPS HPI-400 W para 12 posições determinadas sobre o plano de ensaio. Os pontos de iluminação foram distribuídos uniformemente no recinto, levando-se em conta os contornos do plano de ensaio, o direcionamento da luz para o plano de ensaio e o próprio tamanho da luminária, totalizando 49 pontos com área correspondente ao da célula de referência, movida de ponto para ponto da matriz, utilizada para fins de distribuição dos níveis de irradiância ou a malha de distribuição das luminárias projetadas. A partir dessa matriz foi possível determinar, a iluminância média, mínima e máxima, bem como o fator de não uniformidade espacial através da Eq.(2) de acordo com a norma IEC 904-9, que permitirá classificar o simulador referenciando a Tab. 1. Basicamente, a metodologia consistiu em medir, seqüencialmente, o espectro da luminária, com a célula de silício cristalino posicionada num ponto da matriz do plano de ensaio para 12 posições da luminária, na condição de estabilidade

temporal da irradiância que por sua vez é medida através de uma célula de referência posicionada num ponto fixo da matriz do plano de trabalho.

Antes de realizar a aquisição seqüencial de dados de tensão ao longo da duração da irradiância incidente da luminária em cada ponto, foram registradas as correntes tomadas em intervalos de 20s (utilizando um dos multímetros HP34401A) como indicador da estabilidade temporal da irradiância da lâmpada. As medições da corrente através da célula de referência foram então realizadas manualmente com um dos multímetros HP34401A. Com a célula instalada no ponto (cada ponto = célula 280 mm x 280 mm) adequado da matriz e o multímetro correspondente programado, ao incidir a luz da luminária e após verificação da estabilidade temporal da irradiância, a aquisição de dados é iniciada, sendo prolongada pelo número de medições correspondente ao número de pontos pré-programado.

As células foram instaladas no plano onde os módulos fotovoltaicos sob teste normalmente recebem a radiação. A Eq. (2), utilizada conforme a norma (IEC 60904-3, 2008) para esse tipo de correção, foi aplicada nos cálculos, sendo que para tanto foi determinado o somatório das tensões (mV) das várias posições da luminária em cada ponto da matriz medida pela célula de referência através do multímetro correspondente, que ao ser correlacionado com a constante da célula de referência “móvel” permitiu determinar o nível de irradiância em cada ponto programado da matriz representativa da área do plano de trabalho. A partir desses valores obtêm-se a porcentagem de radiação correspondente a radiação solar padrão. Os cálculos foram repetidos para 4 áreas diferentes de trabalho.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teoricamente, através do projeto de simulação “DIALux” com “arquivos fotométricos em formato padrão IES” de fabricantes de luminárias integrados é selecionada a luminária PHILIPS HNF207 1\*HPI-T2000W/WB\_646 com lâmpada de vapor metálico PHILIPS HPI-2000 W e, obteve-se com relação ao plano de ensaio com dimensões 1,6m x 2m x 2m (altura x largura x profundidade), a quantidade de 12(4x3) luminárias e a distribuição das respectivas coordenadas em relação às paredes laterais.

Em termos experimentais, o conteúdo espectral das luminárias deve se aproximar relativamente bem do espectro global de referência AM1,5 para garantir testes eficazes de módulo fotovoltaico. Os valores de irradiância real da lâmpada de vapor metálico produziram o espectro (cor vermelha) indicado na Fig. 2.

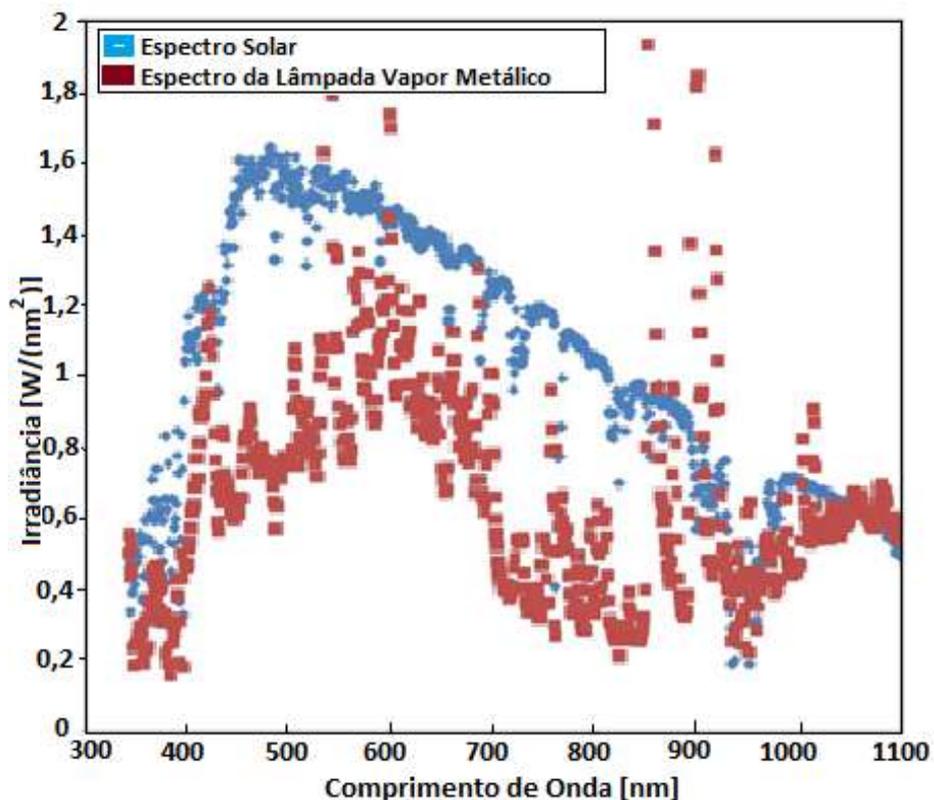


Figura 2 - Irradiância espectral da lâmpada de 400W obtida com o radiômetro EPP2000.

A correspondência espectral obtida com o espectro AM1,5G também é mostrada. O nível de correspondência do espectro da fonte de luz com o espectro padrão (AM1,5G) é um parâmetro importante na quantificação da qualidade do simulador solar. A quantificação do espectro da lâmpada e a sua classificação em relação ao casamento espectral são apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3- Classificação do sistema de iluminação em relação ao casamento espectral da irradiância incidente medida com radiômetro EPP2000 de luminárias de 400 W.

Comprimento de onda (nm)	Espectro Solar AM1,5G (W/m <sup>2</sup> )	Espectro da lâmpada vapor metálico (W/m <sup>2</sup> )	Razão (SM)	Classe
400-500	139	75.303	0.542	C
500 -600	151	108.769	0.720	B
600 -700	139	92.652	0.666	B
700 -800	113	46.434	0.410	C
800-900	94	78.519	0.835	A
900-1100	118	115.504	0.9781	A

Apartir da Tab. 3, em relação ao casamento espectral o simulador é classificado como classe “C”, pois segundo a norma IEC 904-9, predomina a menor classe.

A distribuição da não uniformidade sobre o plano de ensaio foi avaliada para o simulador solar com lâmpada de vapor metálico de 400 W, realizando medições da irradiância em 49 pontos distribuídos em toda a área. Em cada ponto foram realizadas 12 medidas da irradiância incidente correspondente a cada posição da luminária sob o plano de ensaio e calculado o somatório destes valores. Foi usada uma célula de referência para realizar as medidas.

Na Tab. 4 encontram-se os valores do fator de não uniformidade (SN) e as respectivas classificações de acordo com as áreas retangulares caracterizadas pelos lados (2m x 2m), (2m x 1,45m), (2m x 0,87m), (1,45m x 1,45m) e (0,87m x 0,87m).

Tabela 4- Classificação do sistema de iluminação em relação a não uniformidade da irradiância incidente de luminárias de 400 W no plano de ensaio.

Área (m <sup>2</sup> )	Fator (SN)	Classe
4m <sup>2</sup>	12%	
2m x 1,45m	10%	C
2m x 0,87m	9%	C
2 m <sup>2</sup>	5%	B
1 m <sup>2</sup>	3%	B

Apartir da Tab. 4, em relação a não uniformidade o simulador é classificado como classe C, pois segundo a norma IEC904-9, predomina a menor classe. Para a área de 4 m<sup>2</sup>, apesar do fator (SN) não estar dentro do intervalo de classificação “C” para efeitos de exposição contínua de módulos fotovoltaicos pode-se considerar aproveitável por estar muito próximo dos 10% exigidos na norma IEC 904-9. Na Fig.3, apresentam-se os resultados da irradiância em cada ponto da matriz do plano de ensaio para as 12 posições programadas da luminária de 400 W situada a 1,6 m de altura do plano de ensaio, sendo em (a) uma representação discreta e em (b) uma representação contínua.

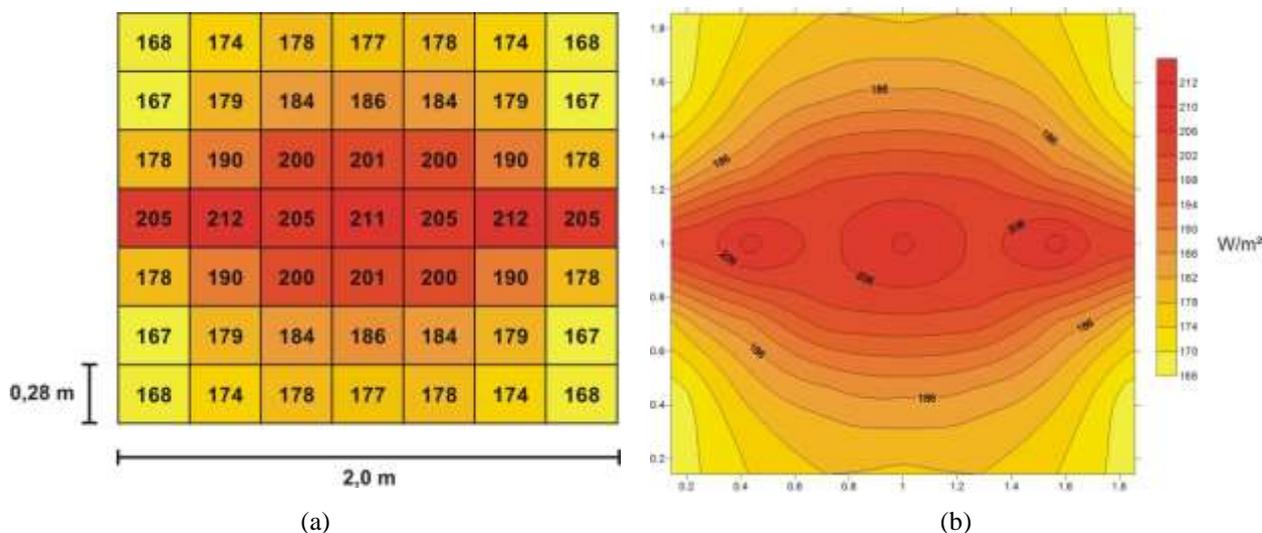


Figura 3 – Valores do somatório de irradiâncias incidentes em (W/m<sup>2</sup>) nos pontos de iluminação da matriz do plano de ensaio para 12 posições da luminária de 400 W, sendo em (a) uma representação discreta e em (b) uma representação contínua.

Neste estudo sobre um simulador solar com dimensões de 1,6 m x 2 m x 2 m (altura x largura x profundidade) para 12 (4 × 3) lâmpadas de vapor metálico PHILIPS HPI-400 W selecionadas como fonte de irradiância incidente obteve-se radiação correspondente a aproximadamente 20% de radiação solar terrestre na condição de 1000W/m<sup>2</sup>. Entretanto, para se atingir o objetivo de aproximar dos 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância serão selecionadas lâmpadas HPI-2000 W.

Em relação à estabilidade temporal da luminária, na Fig.4, apresentam-se os resultados da estabilidade temporal da irradiância incidente da luminária de vapor metálico medindo a corrente de uma célula solar que é monitorada através de um multímetro durante 30 minutos em intervalos de 30 segundos. Determinou-se o fator para classificação, segundo a norma IEC 904-9 e de acordo como o valor do fator calculado pode-se classificar este equipamento como classe A.

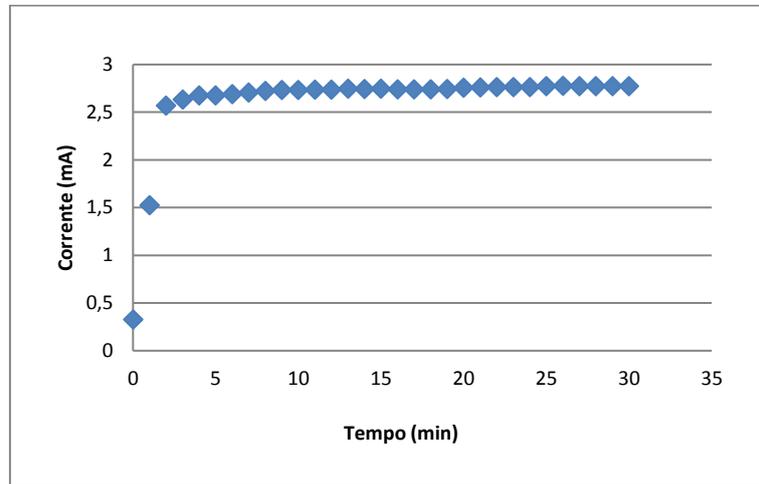


Figura 4 – Corrente ao longo do tempo na célula de referência registrado por um multímetro durante exposição da irradiância da lâmpada de vapor metálico de 400 W.

Dos valores registrados, conforme apresentado na Fig. 4, observou-se que deveriam ser considerados os valores do intervalo de maior estabilidade, de 7 a 30 minutos. Esta observação inicial demonstrou que ao acionar a lâmpada a estabilidade temporal é atingida após ter decorrido aproximadamente 7 minutos.

Todas as medidas feitas com uma luminária de 400 W, apresentadas neste item, tem apenas propósitos acadêmicos, pois o conjunto luminária/lâmpada de 2000 W, que foi dimensionada para que o simulador alcance o nível de irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, terá características fotométricas diferentes, de forma que terá de ser feita uma nova medida para ela.

#### 4. CONCLUSÃO

Um simulador solar com lâmpadas de vapor metálico como fonte de irradiância luminosa foi considerado para atender especificação Classe C na região do visível para uma câmara de exposição à radiação simulada continua de módulos fotovoltaicos. Neste estudo sobre um simulador solar com dimensões de 1,6 m x 2 m x 2 m (altura x largura x profundidade) 12 (4 × 3) lâmpadas de vapor metálico PHILIPS HPI-400 W foram selecionadas como fonte de luz e obteve-se irradiâncias correspondentes a aproximadamente 200 W/m<sup>2</sup>. Para se atingir o objetivo de aproximar dos 1000W/m<sup>2</sup> de irradiância incidente no plano de ensaio da câmara de exposição em estudo, serão utilizadas lâmpadas HPI-2000W.

#### 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

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982. NBR 5413 - Iluminância de Interiores: especificação. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. NBR ISO/CIE 8995-1 - Iluminância de Ambientes de Trabalho: Parte 1:interior.

- Beeson, E.J.G., 1978. The CSI Lamp as a Source of Radiation for Solar Simulation, Lighting Research and Technology, pp.164-166.
- Codd, D.S., Carlson, A., Rees, J., Slocum, A.H., 2010. A low cost high flux solar simulator. Sol Energy 2010; 84(12): 2202–12.
- Droz, C., Roux, J., Rouelle, S.B., Valitutti, P., Beljean P.R., 2008. Mastering the spectrum in class A pulsed solar simulators. In: Proceedings of the 23rd EUPVSEC, Valencia; p.326–9.
- DIALux 4.11, 2017. “Software para projeto de iluminação”, disponível no endereço eletrônico <https://www.dial.de/en/software/dialux/download/>, capturado em 23 de Outubro de 2017.
- Ekman, B.M., Brooks, G., Rhamdhani, M.A., 2015. Development of high flux solar simulators for solar thermal research. Sol Energy Mater Sol Cells;141:436–46.
- Ferrer, J.P., Martínez, M., Trujillo, P., Rubio, F., Askins, S., Domínguez, C., 2012. Indoor characterization at production scale: 200 kWp of CPV solar simulator measurements. In: Proceedings of 8th international conference on concentrating photovoltaic systems AIP. 1477; P. 161-4.
- Fraunhofer ISE, 2017. Photovoltaics Report, updated: 12 July 2017, disponível no endereço eletrônico <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>, capturado em 23 de Setembro de 2017.
- Guechi, A., Chegaar, M., 2007. Effects of diffuse spectral illumination on microcrystalline solar cells. J. Electron Devices; 5: 116–21.
- IEC, 2007. International Electrotechnical Commission. IEC 60904-9 - Standard for Solar Simulator Performance Requirements.
- IEC, 2008b. International Electrotechnical Commission. IEC 60904-3 - Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data”.
- Kenny, R.P., Viganó, D., Salis, E., Bardizza, G., Norton, M., Müllejans, H., et al, 2013. Power rating of photovoltaic modules including validation of procedures to implement IEC 61853 on solar simulators and under natural sunlight. Prog Photovolt: Res Appl; 21(6):1384–99.
- Kim, K.A., Dostart, N., Huynh, J., Krein, P.T., 2014. Low-cost solar simulator design for multijunction solar cells in space applications. In: Proceedings of IEEE power and energy conference at Illinois, PECEI.
- Kohraku, S., Kurokawa, K., 2006. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator. Sol Energy Mater Sol Cells; 90: 3364–70.
- Matson, R. J., Emery, K. A. and Bird, R. E., 1984. Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation and Solar Cell Short-Circuit Current Calibration: A Review, Solar Cells, 11 105-145.
- Mohan, A., Pavithran, J., Osten, K.L., Jinumon, A., Mrinalini, C.P, 2014. Simulation of spectral match and spatial non-uniformity for LED solar simulator. In: Proceedings of IEEE global humanitarian technology conference-South Asia satellite (GHTCSAS); p.111–7.
- Novickovas, A., Baguckis, A., Mekys, A., Tamosiūnas, V., 2015. Compact light-emitting diode-based aaa class solar simulator: design and application peculiarities. IEEE J Photovolt; 5(4): 1137–47.
- Pernpeintner, J., Happich, C., Schiricke, B., Lichtenthäler, N., Weinhausen, J., 2015. Linear Focus solar simulator test bench for non-destructive optical efficiency testing of parabolic trough receivers. Energy Procedia; 69: 518–22.
- PROCEL EPP, Agosto de 2011. Manual de Iluminação.
- Sabahi, H., Tofigh, A.A., Kakhki, I.M., 2016. Bungypoor-Fard H. Design, construction and performance test of an efficient large-scale solar simulator for investigation of solar thermal collectors. Sustain Energy Technol Assess; 15:35–41.
- Vedat, E., Şafak, S., Bülent, O., 2017. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 77 1240–1250.

## DEVELOPMENT OF SOLAR SIMULATOR FOR CONTINUOUS EXPOSURE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

**Abstract.** *There are several technologies photovoltaic modules that show efficiency variation after a period of exposure to solar radiation. The use of natural solar radiation is problematic as there are variations of exposure intensity on cloudy or rainy days and intermittence between day and night. In this case considering solar simulators for prior exposure of photovoltaic modules can lead to an interesting alternative. The irradiance source is the most important component of the solar simulators used in the testing of photovoltaic modules. For light soaking test under continuous radiation, an artificial light exposure chamber with approximately 1000 W/m<sup>2</sup> irradiance is required. This work focuses on the adaptation of the output spectrum of the simulator to the reference of the spectral distribution of the solar radiation in the solar spectral distribution AM1,5G as defined in the standard IEC 60904-3. The objective is to achieve the Class C Spectral Concordance as defined in the international standard (IEC 60904-9, 2007). In this preliminary study about a solar simulator with dimensions of 1.6 m x 2 m x 2 m (height x width x depth) 12 (4 x 3) PHILIPS HPI-400 W metal vapor lamps were selected as light source and irradiance corresponding to approximately 200 W/m<sup>2</sup>. In order to reach the objective of approaching the 1000 W/m<sup>2</sup> of irradiance incident in the test plan of the exposure chamber under study, one possibility would be the use of HPI-2000 W.*

**Key words:** *Solar simulator, photovoltaic module, irradiance source*