

APRIMORAMENTO DE UM SIMULADOR SOLAR CONTÍNUO UTILIZANDO O MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE TRAÇADO DE RAIOS ÓPTICOS

José Alejandro Moreno Alfonzo – joc.alejandro.m@gmail.com

Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Brasil

Luiz Ângelo Berni

Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, Brasil

Denis Gilbert Francis David

Thierry Jacques Lemaire

Tiago Franca Paes

Marcus Vinicius Santos da Silva

Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Brasil

Resumo. O Laboratório de Certificação de Componentes de Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica (LABSOLAR) do Instituto de Física da UFBA, foi construído com o objetivo de disponibilizar estudos e serviços de caracterização, certificação e etiquetagem para painéis fotovoltaicos (PV). O laboratório possui os equipamentos necessários para seguir os procedimentos citados na norma IEC 61215 (de 2021), que tem como objetivo verificar se os módulos PV terrestres são adequados para operação de longo prazo em climas gerais ao ar livre. Um dos equipamentos desenvolvidos é o Simulador Solar Contínuo cuja primeira versão possuía uma qualificação BCA em relação à correspondência espectral, não-uniformidade e instabilidade temporal. A área de teste era de 1 m^2 ($0,71 \text{ m} \times 1,43 \text{ m}$) com uma Irradiância média de 778 W/m^2 . Estas condições não eram favoráveis, já que o objetivo era realizar ensaios em painéis de 2 m^2 ($2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$). Este projeto consistiu em aprimorar a óptica da fonte de luz para aproveitar melhor a iluminação fornecida pelas lâmpadas evitando perdas. Utilizando o programa Zemax OpticStudio® para simular diversos cenários e ângulos, diminuimos consideravelmente o tempo de testes e desperdício de materiais. O resultado foi uma segunda versão do equipamento com uma classificação BBA capaz de iluminar uma área de teste de 2 m^2 ($1,02 \text{ m} \times 2,02 \text{ m}$) com uma Irradiância média de 826 W/m^2 , utilizando a mesma quantidade de lâmpadas que a primeira versão. Em outras palavras, um aumento na eficiência em relação a área em 100%. O equipamento já foi utilizado em serviços de verificação e certificação por clientes da indústria para o pré-condicionamento de módulos, fornecendo de forma contínua e controlada a radiação para atingir os 10 kWh/m^2 que especifica a norma, etapa inicial da sequência de testes que devem ser realizados para ensaios deste tipo, seguindo o programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

Palavras-chave: Simulador Solar Contínuo, Norma internacional IEC, Zemax OpticStudio®, Não-uniformidade.

1. INTRODUÇÃO

Um Simulador Solar Contínuo (SSC) é um dispositivo utilizado em laboratórios e indústrias para realizar testes de insolação artificial em condições controladas (Alfonzo *et al.*, 2020). No campo da Energia Solar Fotovoltaica é utilizado para realizar diversos ensaios em painéis solares, para assim, verificar algumas características como rendimento elétrico, resistência à insolação e qualidade dos materiais (IEC 61215 de 2021). A maioria dos simuladores de grande área que se encontram no mercado nacional atualmente possuem um elevado custo de compra e importação.

O Laboratório de Certificação de Componentes de Energia Solar Fotovoltaica (LABSOLAR) do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia no Brasil, desenvolveu um SSC a partir de lâmpadas de Halogêneos Metálicos compatíveis com o holofote SCENA 650/1000S, que foi a base do desenvolvimento do equipamento desde o escopo inicial do projeto (Fig. 1). O equipamento foi avaliado em termos de distribuição espectral, qualidade da uniformidade e estabilidade da radiação, seguindo as normas da *International Electrotechnical Commission* 60904-9.

Um dos objetivos específicos do projeto inicial foi atingir as características e classificação exigidas pela norma IEC 61215: Módulos fotovoltaicos terrestres (PV) de silício cristalino - qualificação de projeto e homologação, para a realização de pré-condicionamento e teste de resistência de ponto quente. Para o caso de pré-condicionamento, a norma só especifica que seja classe C, entretanto, para os ensaios de ponto quente é necessário que se cumpra os seguintes requisitos: Irradiância ajustável entre 700 e 1000 W/m^2 , Distribuição espectral classe C ou melhor, Não-uniformidade classe A, e Instabilidade temporal classe B ou melhor (IEC 61215 de 2021).

A correspondência espectral é definida mediante o desvio em relação à distribuição espectral de referência AM1.5G, conforme estabelecido na IEC 60904-3. O espectro é dividido em 6 intervalos de interesse cuja porcentagem de irradiância é calculada em função da irradiância total do espectro. Para cada intervalo calcula-se a razão entre a porcentagem calculada e a porcentagem de referência. Este resultado indica a classificação seguindo a seguinte relação: Classe A para correspondência espectral entre 0,75 – 1,25, Classe B para correspondência espectral entre 0,6 – 1,4, e Classe C para correspondência espectral entre 0,4 – 2,0.

A análise da não-uniformidade da irradiância verifica qual é a diferença em termos de porcentagem entre a irradiância máxima ($Máx_{irrad}$) e a mínima ($Mín_{irrad}$) detectadas no plano de teste. O objetivo é comprovar que a radiação emitida pelo simulador seja a mais uniforme possível ao longo da área onde deseja-se colocar um painel fotovoltaico, isto para evitar maiores ou menores produções de correntes elétricas entre as células que o compõem. O indicativo para constatar a classificação segundo essa característica é o cálculo a partir da equação 1 a seguir:

$$\text{Não – uniformidade}(\%) = \left[\frac{Máx_{irrad} - Mín_{irrad}}{Máx_{irrad} + Mín_{irrad}} \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

O procedimento indica que se deve realizar medidas de irradiância em diversos pontos na área de teste utilizando uma célula de silício encapsulada com resposta espectral apropriada, ou um minimódulo fotovoltaico devidamente calibrado. A área precisa ser dividida em pelo menos 64 pontos equidistantes, ou em subáreas que não ultrapasse 400 cm² (IEC 60904-9). A classificação referente a este quesito é definida a partir da seguinte relação: Classe A para resultados $\leq 2\%$, Classe B para resultados $\leq 5\%$, e Classe C para resultados $\leq 10\%$.

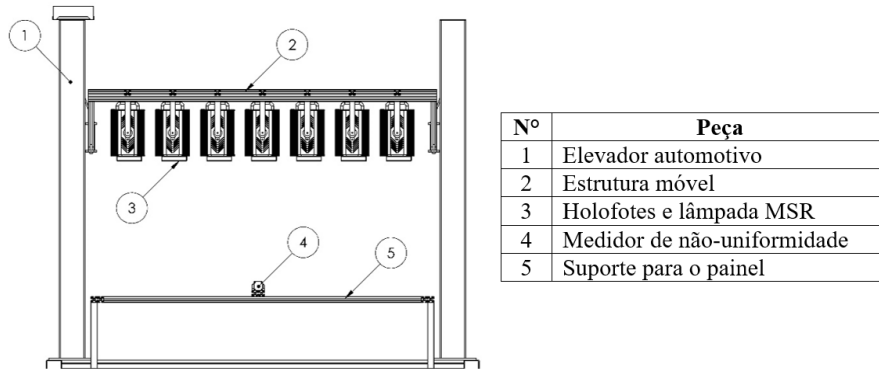


Figura 1 - Primeira versão do Simulador Solar Contínuo desenvolvido no Laboratório de Certificação de Componentes de Energia Solar Fotovoltaica (LABSOLAR) do Instituto de Física da UFBA a partir de 40 lâmpadas de Halogêneos Metálicos dentro de holofotes SCENA 650/1000S. (Fonte: Alfonzo *et al.*, 2020).

Existem duas instabilidades temporais a serem avaliadas a depender do estudo que se deseja realizar com o SSC: instabilidade a curto prazo (STI) e a instabilidade a longo prazo (LTI). Para medições I-V, avalia-se a instabilidade a curto prazo num período de duas vezes o tempo necessário para realizar uma aquisição de dados de corrente-tensão (Alfonzo *et al.*, 2020). Durante este período utiliza-se os valores da máxima e mínima irradiância medida com um detector para calcular o desvio. Para ensaios de resistência à exposição da irradiância e pré-condicionamento, a LTI é a característica a ser avaliada para obtenção da classificação. O critério utilizado é o mesmo utilizado para a não-uniformidade Classe A para $\leq 2\%$, Classe B para $\leq 5\%$, e Classe C para $\leq 10\%$.

Para a nova versão do SSC, substituindo os holofotes por espelhos, o presente estudo realiza modelagem de simulação computacional utilizando o programa Zemax OpticStudio® para estimar a não-uniformidade num plano de teste de 2 m² (2 m x 1 m) a partir de novas configurações. Os resultados são comparados com medidas reais para realizar ajustes ao identificar as principais perdas de energia que não foram quantificadas anteriormente (Rahou *et al.*, 2015). As simulações também nos permitem identificar que tipos de modificações seriam mais promissoras, reduzindo assim o tempo e os recursos necessários e, desta maneira, alcançando o objetivo de maneira mais rápida e segura.

2. METODOLOGIA

A seguinte metodologia tem como objetivo geral redesenhar toda a óptica do Simulador Solar Contínuo desenvolvido no LABSOLAR, tanto para aumentar a área de teste para 2 m² (2 m x 1 m), como para aumentar a irradiância disponível a valores iguais ou superiores a 800 W/m². Estas modificações devem manter as condições de Distribuição Espectral com classificação B e Instabilidade Temporal com classificação A, em conformidade com a norma IEC 60904-9. Estas condições são essenciais para poder realizar pré-condicionamentos de módulos seguindo o fluxograma de ensaios da norma IEC 61215.

2.1 Substituição dos holofotes por espelhos

O Simulador Solar Contínuo contém um total 40 lâmpadas de vapor metálico cujo consumo médio por lâmpada, está em torno de 334 W, o que resulta numa potência total de 13.360 W. Essa energia é drasticamente perdida em forma de calor pelo fato de que as lâmpadas se encontravam dentro de holofotes modelo SCENA 650/1000 S (Alfonzo *et al.*, 2015). Considerando que a lâmpada seja uma fonte pontual ou puntiforme, o sistema óptico interno do holofote só captura uma pequena fração da luz propagada por uma lente Fresnel frontal, o resto da luz assume-se que é absorvida pelo metal preto opaco das laterais e superior interno do holofote (Fig. 2).

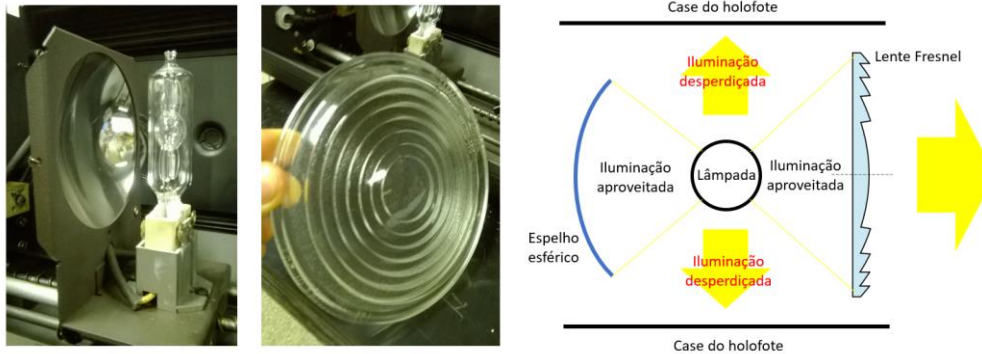


Figura 2 - Óptica interna do holofote SCENA 650/1000 S. Na parte posterior da lâmpada tem um espelho esférico e na frente tem uma lente Fresnel. É perceptível que grande parte da radiação da lâmpada é absorvida pela estrutura do holofote.

Para evitar a perda de energia mencionada anteriormente, optou-se por retirar a lâmpada do interior do holofote e instalar as 40 lâmpadas numa matriz na frente de um espelho plano de grande área (Fig. 3a) que consiga redirecionar a iluminação na direção do plano de teste. Utilizando espelhos laterais inclinados a radiação lateral será redirecionada ao plano de teste com o propósito de converter o grande sistema semelhante a um espelho “parabólico” com múltiplas lâmpadas no foco do conjunto de espelhos (Fig. 3b).

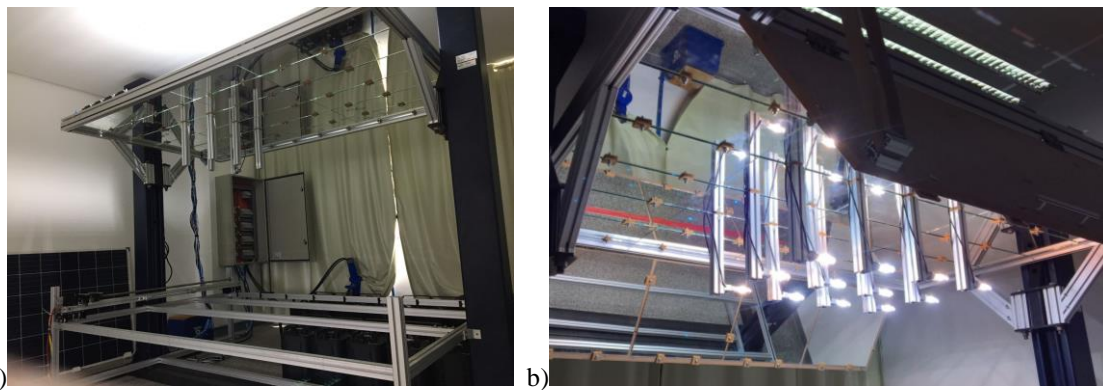


Figura 3 - a) Espelho de grande área instalado como refletor das lâmpadas para o direcionamento vertical da iluminação do Simulador Solar Contínuo. b) Espelhos laterais inclinados para redirecionar a luz para o plano de teste. Entre os espelhos estão os elementos de fixação com quadrados de cortiça, material resistente a altas temperaturas assim como bons isolantes de vibrações (fase de construção do SSC).

Cada plano de espelho é compreendido por vários espelhos dimensionados e recortados de forma que a separação entre eles tem o espaço suficiente para os elementos de fixação tanto dos próprios espelhos como das barras que sustentam as lâmpadas. Para absorver vibrações entre as barras de suporte, espelhos e elementos de fixação, foram colocados separadores de cortiça (Fig. 5), material resistente a altas temperaturas com uma temperatura de combustão superior a 250 °C.

2.2 Simulação com Zemax OpticStudio®

O programa Zemax OpticStudio® foi utilizado no modo de traçado não sequencial para obter parâmetros radiométricos do SSC a partir de simulação de caminhos ópticos estabelecidos. Este modo de simulação é amplamente utilizado no projeto de sistemas de iluminação e no estudo de luz difusa em sistemas ópticos, pois considera que um raio de luz após interagir com uma superfície pode se propagar em qualquer direção. No estudo do simulador, cada lâmpada foi simulada considerando uma região cilíndrica de emissão de 6mm de comprimento e 4mm de diâmetro. A potência utilizada para cada lâmpada foi inicialmente de 334 W que posteriormente foi mudada para 282 W, valor obtido de medições de irradiação no laboratório. Foram considerados 9 comprimentos de onda distribuídos entre 350 nm e 1150 nm com pesos conforme o espectro fornecido pelo fabricante. Para a medida da irradiância no plano de teste do simulador, foi considerada uma matriz com 200 sensores cada um com uma área de 10cm x 10cm. Os espelhos planos são de segunda face e apresentam reflectância de 65%, valor medido no laboratório. Para o início da simulação foram considerados 4×10^7 raios distribuídos entre as 40 lâmpadas.

Um gráfico de calibração de parâmetros foi realizado no início do estudo para comparar a irradiância gerada pelo Zemax para $y = 0$ (centro) e x , variando de -1000 a 1000 mm, com uma curva medida para uma lâmpada (Fig. 4). A lâmpada foi simulada com potência de 334 W, região cilíndrica de emissão de $L = 6$ mm e $R = 2$ mm, com 10 milhões de

raios. O resultado indicou que a potência de 334 W para simulações era superior à real, posteriormente foi mudado este valor para 282 W como definido anteriormente. Entretanto, o comportamento e forma da curva foi bem próximo ao real.

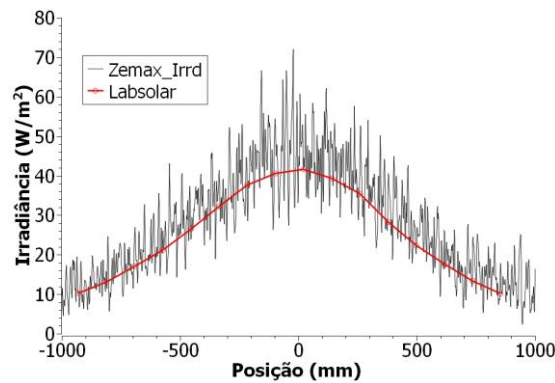


Figura 4 - Gráfico de calibração de parâmetros para comparar a irradiância gerada pelo Zemax OpticStudio® para $y = 0$ (centro) e x , variando de -1000 a 1000 mm, com uma curva medida para uma lâmpada. A lâmpada foi simulada com potência de 334W, região cilíndrica de emissão de $L = 6\text{mm}$ e $R = 2\text{mm}$, com 10 milhões de raios.

2.3 Simulações de caminho óptico do SSC

Cada simulação realizada pelo Zemax OpticStudio® cujo resultado era promissório passava por uma adequação dos espelhos, posição das lâmpadas em 4 eixos (X, Y, Z e rotação em torno de Z) para validação. O mapa foi realizado por um robô desenvolvido especialmente para esta tarefa, reduzindo drasticamente o tempo da análise (Alfonzo *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2019). A aquisição de dados é obtida mediante uma célula solar de m-Si de 2 W calibrada num simulador solar de bancada ORIEL Sol3A com classificação AAA. (Alfonzo *et al.*, 2020).

As primeiras simulações visaram identificar a curva inicial do sistema considerando as 40 lâmpadas distribuídas numa matriz uniforme como apresentado na Fig. 5, com apenas o espelho superior a uma distância de 300 mm das lâmpadas. O resultado evidenciou uma queda da irradiância nos extremos dos eixos X e Y, concentrando o valor máximo no centro do plano de teste.

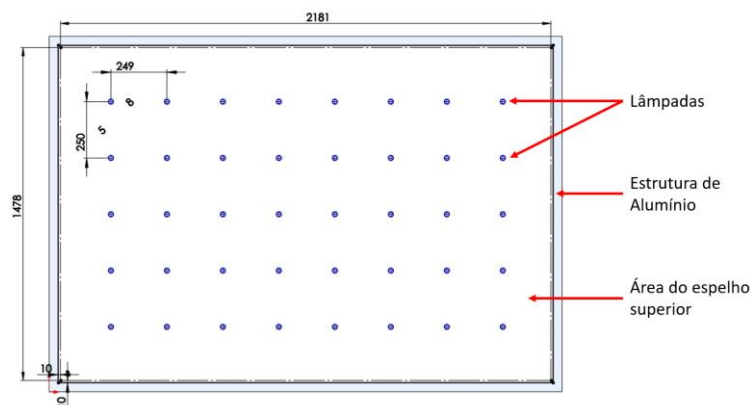


Figura 5 - Parâmetros de distribuição das 40 lâmpadas numa matriz uniforme utilizado para as primeiras simulações. O objetivo é identificar a irradiância média, mínima, máxima, e não-uniformidade em função do eixo X e Y sem espelhos laterais inclinados.

A segunda sequência de simulações considerou os espelhos inclinados nas laterais a 120° mantendo a distribuição uniforme das lâmpadas segundo a Fig. 7. O objetivo foi evidenciar o aumento da eficiência ao direcionar grande parte da luz propagada em direção ao plano de teste semelhante a um espelho parabólico. A hipótese sugeriu melhorar a distribuição no eixo Y (ao longo de 1 m de largura) e aumentar drasticamente a irradiância máxima e média de toda a área.

Para melhorar a distribuição no eixo X (ao longo dos 2 m de comprimento), após diversas discussões, considerou-se que a melhor alternativa seria concentrar as fileiras de lâmpadas nas bordas da área de teste em direção ao mesmo eixo (Fig. 6). Desta maneira, a organização das lâmpadas permite descentralizar o pico máximo central para as laterais onde ainda percebia um déficit de potência para uma não-uniformidade favorável. Este foi o novo parâmetro para a terceira fase de simulações.

Na quarta sequência de simulações foram realizadas mudanças estruturais, adição de espelhos se necessário, mudança de posicionamento das lâmpadas, inclusive rotacionalmente. São diversas variáveis que interferiram negativamente na não-uniformidade, entre elas a diferença de eficiência e curvas de aquecimento entre as lâmpadas, interferência das barras que sustentam as lâmpadas, a refletância real do espelho, pequenos desalinhamentos entre espelhos que deveriam ser perfeitamente paralelos, gradiente de temperatura que se formava na sala após um tempo de

aquecimento, entre outros fatores externos. É praticamente impossível simular todas essas variáveis dentro do Zemax OpticStudio®, por isso, a partir deste momento foram realizadas simulações com iterações a partir de comprovações com medidas reais até atingir o objetivo.

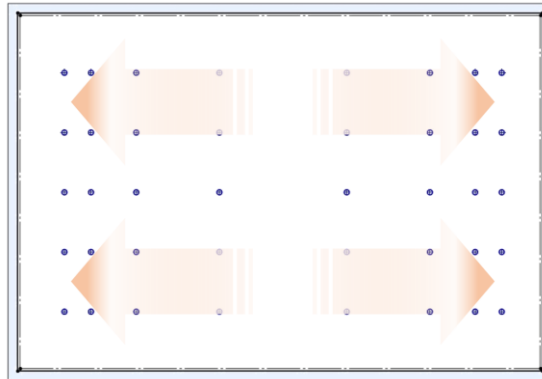


Figura 6 - Distribuição de lâmpadas para descentralizar a irradiância no eixo X ao longo dos 2 m do plano de teste.

2.4 Mapa de não-uniformidade

Foi desenvolvido no Labsolar, um sistema automatizado para realizar mapeamento do plano de teste composto por motores de passo, fusos para locomoção e uma célula calibrada. Este sistema, controlado por um microcontrolador, permite realizar mapas de não-uniformidade numa área de 2 m² em menos de 30 min (Rocha *et al.*, 2019). O resultado final deve ser medido seguindo um criterioso procedimento de aquecimento evitando interferências externas, para garantir que o equipamento esteja trabalhando dentro da área de estabilidade temporal < 2% (classe A).

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

No total, foram realizadas mais de 24 simulações. A seguir serão apresentadas as mais significativas que marcaram um avanço tangível no aprimoramento do SSC. Os parâmetros globais estabelecidos para as simulações 1, 2 e 3 foram: potência de cada lâmpada = 334W, quantidade de lâmpadas = 40, espelho superior = 2181 mm x 1478 mm, e distância espelho/lâmpadas = 300 mm. Para a última sequência de simulações a potência das lâmpadas mudou para 282 W, valor que se aproxima ao real obtido a partir de aquisição real.

3.1 Simulação 1

Para a primeira sequência de simulações (Fig. 7) é possível observar o resultado mais representativo que apresenta tanto a modelagem 3D como o resultado do mapa de não-uniformidade. A irradiância máxima obtida no centro do plano foi de 954 W/m², a mínima obtida nos quatro cantos foi de 634 W/m². Implementando a equação 1, obtemos uma Não-uniformidade de 20,15%. Como previsto, há uma concentração no centro do plano de estudo, isto foi resolvido nas seguintes simulações.

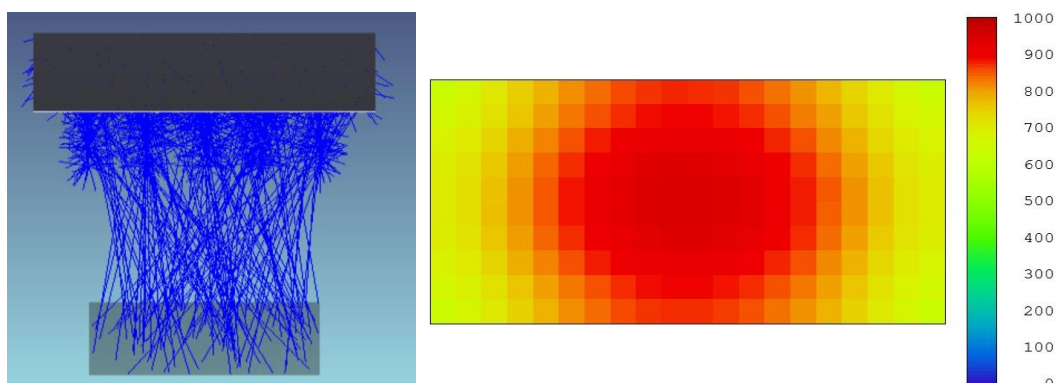


Figura 7 - Resultado mais representativo que apresenta tanto a modelagem 3D (esquerda), como o resultado do mapa de não-uniformidade (direita), de uma simulação realizada no Zemax OpticStudio®. Foram consideradas 40 lâmpadas de 334W a uma distância de 300 mm de um espelho superior de 2181 mm x 1478 mm.

3.2 Simulação 2

Para esta segunda sequência de simulações foram adicionados os espelhos laterais inclinados com o objetivo de direcionar a luz lateral das lâmpadas (Fig. 8). Para definir o ângulo dos mesmos, foram realizadas 5 simulações

considerando os ângulos de 110°, 120°, 130°, 140° e 150° (ângulo entre a direção horizontal e a face oposta ao espelho). Como melhor resultado foi considerado o ângulo de 120°. A irradiância máxima obtida no centro do plano foi de 1252 W/m², a mínima obtida nos quatro cantos foi de 881 W/m², implementando a equação 1, obtemos uma Não-uniformidade de 17,39%.

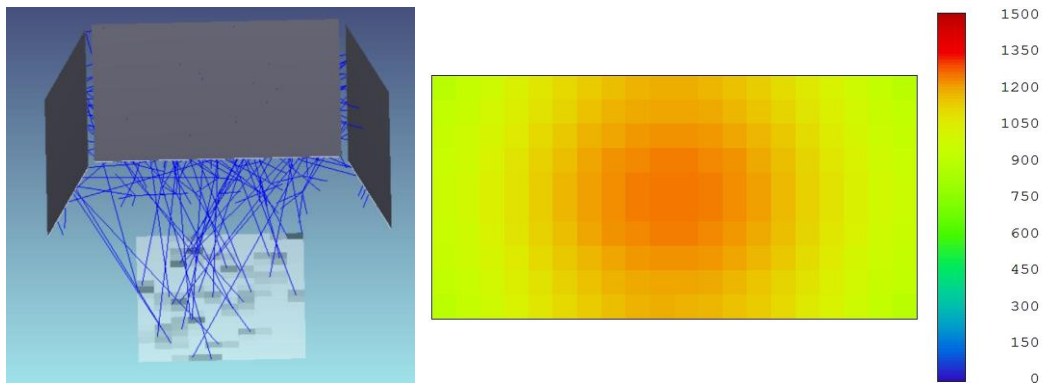


Figura 8 - Modelo 3D (esquerda, com vista de cima do simulador) da simulação adicionando espelhos laterais inclinados a 120° com o objetivo de direcionar a luz lateral das lâmpadas para o plano de teste. A irradiância no plano de teste (direita) registrou um máximo no centro de 1252 W/m² e um mínimo obtido nos quatro cantos de 881 W/m². A partir da equação 1, obtemos uma Não-uniformidade de 17,39%.

3.3 Simulação 3

A partir da Simulação 2 foi possível observar uma melhor distribuição no eixo Y ao longo da largura de 1 m do plano. Entretanto, a distribuição no eixo X ao longo do comprimento de 2 metros, ainda foi observado uma diferença significativa entre o centro e as bordas. Concentrando as lâmpadas nas extremidades (Fig. 9 esquerda) esta distribuição é descentralizada obtendo uma melhor distribuição. O resultado pode ser observado na Fig. 9 a direita onde o pico central estende-se ao longo de uma área maior obtendo dois máximos. A irradiância máxima obtida no centro do plano foi de 1147 W/m², a mínima obtida nos quatro cantos foi de 870 W/m², implementando a equação 1, obtemos uma Não-uniformidade de 13,73%.

Não foi possível concentrar ainda mais as lâmpadas nas extremidades já que dimensionalmente não era possível. Além disso, a irradiância média total conduzia a valores inferiores ao objetivo do trabalho afetando o rendimento negativamente.

3.4 Simulação 4

Para aumentar a irradiância nas bordas (Fig. 9, direita, bordas amarelas), foi necessário acrescentar espelhos verticais para direcionar a luz que sai pelos extremos laterais para o plano de teste especificamente nessa região (Fig. 10). Os espelhos foram fixados próximos ao plano de teste a uma distância de 2,1 m entre eles para garantir uma reflexão e aproveitamento prioritariamente nesta região. Inclusive, a inclinação destes espelhos foi ajustada após alguns mapas, deixando-os ligeiramente inclinados para dentro.

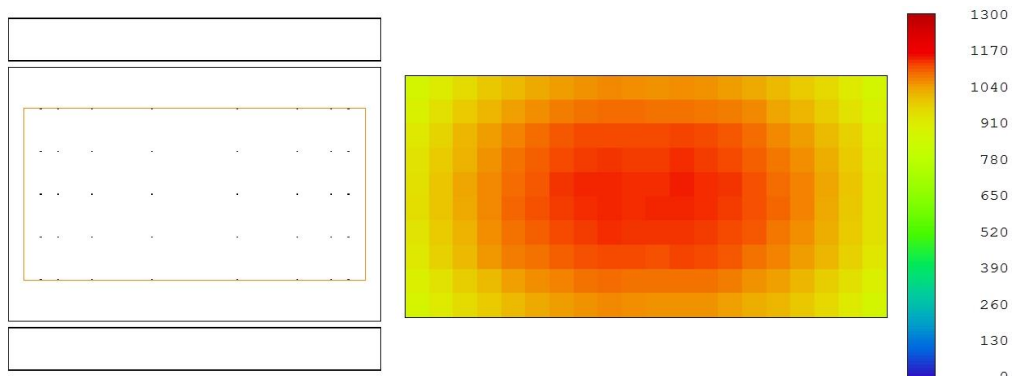


Figura 9 - À esquerda observa-se a nova distribuição das fileiras de lâmpadas para a simulação (vista de cima). A direita se encontra o resultado da distribuição no plano de teste onde o pico central estende-se ao longo de uma área maior obtendo dois máximos. A irradiância máxima obtida no centro do plano foi de 1147 W/m², a mínima obtida nos quatro cantos foi de 870 W/m², implementando a equação 1, obtemos uma Não-uniformidade de 13,73%.



Figura 10 - Espelhos verticais instalados nas extremidades do simulador para aumentar a irradiância nas bordas ao longo dos 2 m do plano de teste.

As simulações para verificar esta hipótese foram realizadas diminuindo a potência das lâmpadas para 282 W. O modelo 3D e o resultado do mapa de não-uniformidade podem ser observados na Fig. 11. É possível observar que não há mais déficit de potência nas bordas, e que os dois picos máximos se afastaram gerando uma área mais uniforme. A irradiância máxima obtida foi de 836 W/m², a mínima obtida foi de 719 W/m², implementando a Eq. 1, obtemos uma Não-uniformidade de 7,52%. Segundo a norma IEC 60904-3, este resultado atribui uma classificação “C” em não-uniformidade.

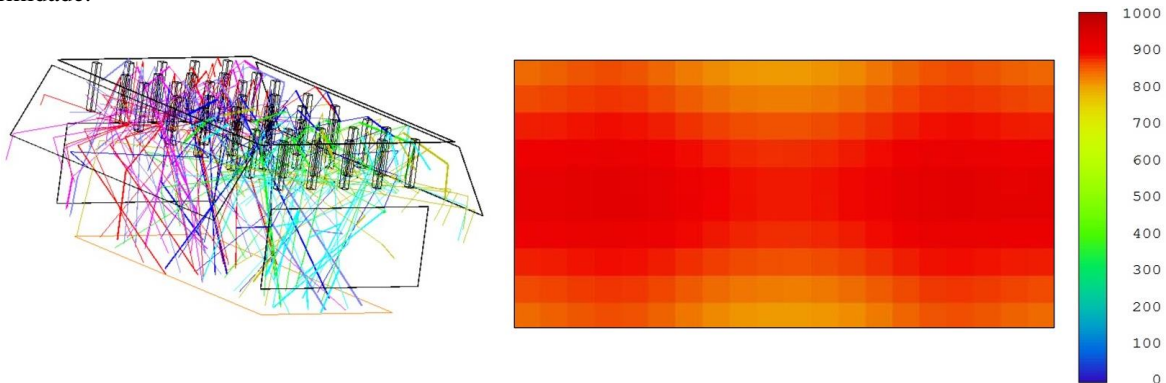


Figura 11 - Simulação incluindo dois espelhos verticais para diminuir a não-uniformidade obtida na simulação da Fig. 9 (direita). O resultado atribui uma não-uniformidade de 7,52% conferindo uma classificação C segundo a norma IEC 60904-3.

3.5 Mapa de não-uniformidade utilizando o sistema automatizado

Utilizando o sistema de aquisição robotizado, foi realizado o mapa no local de teste seguindo as mesmas características e parâmetros utilizados na simulação. O resultado pode ser observado na Fig. 12. A irradiância máxima obtida foi de 886 W/m², a mínima foi de 767 W/m², e média de 832 W/m². Utilizando a Eq. 1, a Não-uniformidade foi de 7,2%, o que corresponde a uma classificação “C” seguindo a norma IEC 60904-9.

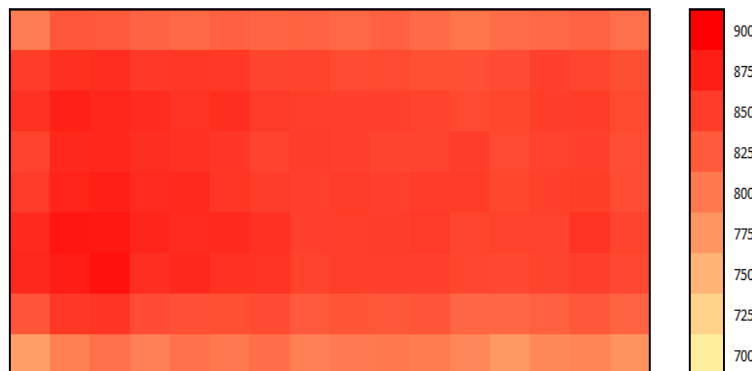


Figura 12 - Mapa de não-uniformidade medida a partir da configuração simulada na Fig. 11 considerando espelhos laterais inclinados a 120° e espelhos verticais nos extremos. A irradiância máxima foi de 886 W/m², a mínima de 767 W/m², e a média de 832 W/m². A Não-uniformidade calculada foi de 7,2% o que atribui uma classificação “C”.

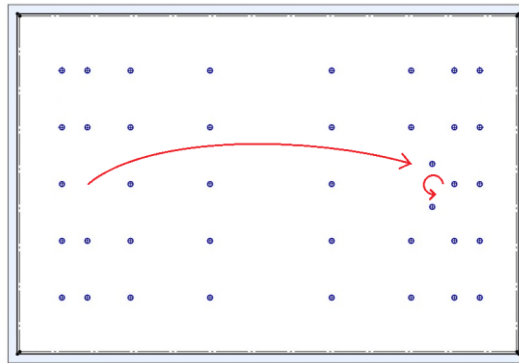


Figura 13 - Reposicionamento de uma lâmpada que se encontrava no meio da segunda coluna na região de maior irradiância, para uma região de menor potência entre a sexta e sétima coluna.



Figura 14 - Resultado do mapa de não-uniformidade medido após o reposicionamento da lâmpada como indicado na Fig. 13. A irradiância máxima obtida foi de 850 W/m², mínima de 769 W/m², e média de 831 W/m² resultando em uma Não-uniformidade de 5,02%, atribuindo uma classificação “C” muito próximo à classificação “B”.

O resultado do mapa medido mostra claramente a diferença entre as condições reais e a simulação. Uma diferença já esperada foi a anisotropia da potência das lâmpadas. As medições elétricas realizadas para cada uma delas apresentou uma variação global entre máximo e mínimo de 24%. Isto foi abordado realocando as lâmpadas e distribuindo-as segundo o mapa apresentado neste resultado (Fig. 12). Uma lâmpada que se encontrava na região de máximo valor do lado central esquerdo, foi reinstalada do lado central direito para diminuir e aumentar, correspondentemente, a potência média nessas regiões (Fig. 13). O resultado pode ser observado na Fig. 14 cuja irradiância máxima obtida foi de 850 W/m², mínima de 769 W/m², e média de 831 W/m². Utilizando a Eq. 1, a Não-uniformidade foi de 5,02%. o que atribui uma classificação “C” muito próximo a classificação “B” apresentando uma melhoria significativa em comparação com o mapa anterior.

Finalmente, observou-se que a diferença entre as bordas superior e inferior segundo a Fig. 14, possuem uma intensidade menor do que o resto do mapa. Para isto, todas as lâmpadas das fileiras externas ao longo do eixo X foram rotacionadas 45° (Fig. 15) com o objetivo de diminuir ligeiramente a intensidade no centro e aumentar ao longo de toda as duas bordas. O resultado pode ser observado na Fig. 16.

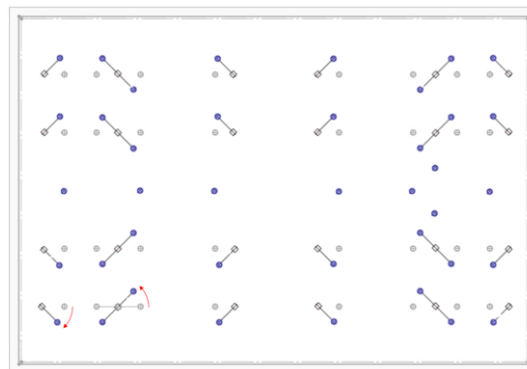


Figura 15 - Reposicionamento das lâmpadas das fileiras externas rotacionando o eixo de fixação de todas elas em 45° como indicam as setas vermelhas no canto inferior esquerdo. Os pontos cinzas indicam a posição anterior, os pontos azuis indicam a nova posição salvo a fileira central que manteve a posição do arranjo anterior.



Figura 16 - Resultado do mapa de não-uniformidade medido após a rotação das lâmpadas como indicado na Fig. 17. A irradiância máxima obtida foi de 846 W/m², mínima de 768 W/m², e média de 826 W/m² resultando em uma Não-uniformidade de 4,87%, atribuindo uma classificação “B”.

Após este último resultado podemos afirmar que o uso da ferramenta Zemax OpticStudio® foi crucial para atingir uma classificação “C” que posteriormente foi conferida com o mapa medido utilizando um sistema de automatizado de aquisição. A melhor não-uniformidade da última simulação foi de 7,52% cuja verificação medida foi de 7,2%. A partir deste ponto foi necessário realizar ajustes importantes de reposicionamento de lâmpadas para poder atingir uma classificação melhor devido a natureza inerente à anisotropia da potência das lâmpadas que, apesar da possibilidade de serem computadas dentro da simulação, decidiu-se que a última calibração seria manual e experimental.

Após as análises das simulações feitas pelo Zemax OpticStudio® e os aprimoramentos mecânicos e ópticos realizados, o SSC foi classificado seguindo a norma IEC 60904-9, a fim de caracterizar módulos fotovoltaicos. Foi verificado que a instabilidade temporal não foi alterada, mantendo-se em 1,75% após 30 min de pré-aquecimento. Considerando que o espectro da lâmpada se manteve igual e que não foram implementados filtros, a correspondência espectral também se manteve constante. O novo SSC obteve uma classificação BBA em relação à correspondência espectral, não-uniformidade e instabilidade temporal.

Um dos objetivos do trabalho era atingir condições para poder realizar pré-condicionamento em módulos de 2m² (2 m x 1 m) segundo a norma IEC 61215. Para isto era necessário obter uma classificação CCC com uma irradiância entre 700 - 1000 W/m². A versão anterior do simulador, com base no holofote SCENA 650 1000 S e classificação BCA, conseguia uma irradiância média de 778 W/m² numa área de teste de 1 m². Esta nova versão com base em espelhos planos superou este objetivo como apresentado anteriormente, classificação BBA fornecendo uma irradiância média de 846 W/m² numa área de teste de 2,14 m² (1,06 m x 2,02 m). Foi possível atingir esta considerável melhoria utilizando o mesmo número de lâmpadas, resultando num aumento da eficiência maior a 100%.

Para trabalhos futuros será analisado o impacto do uso de espelhos planos já que a luz perde sua diretividade, o que é uma característica importante da iluminação solar. Alguns estudos indicam que a relação entre médias anuais da radiação difusa e direta giram em torno de 55,6% e 44,4%, respectivamente (Li *et al.*, 2015). Esta relação deve ser estudada a profundidade para garantir condições o mais próximas possíveis ao sol natural, entretanto, não há indício que isto afete a operação do SSC já que não há norma técnica que estabeleça uma restrição neste quesito.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Profa. Dra. Claudia Lucia Mendes de Oliveira e ao Prof. Dr. Rafael Alves de Souza Ribeiro do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo pela utilização do Zemax OpticStudio®. Agradecemos ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho, indispensável para a execução e compra de materiais mediante taxa de bancada, recurso extremamente indispensável para viabilizar este tipo de investigação de extrema relevância para o país. Agradecemos às secretarias de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI) e de Infraestrutura (SEINFRA) do Estado da Bahia por compartilhar a responsabilidade da manutenção do laboratório onde foram realizados cada um dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- Alfonzo J.A.M.; Achy A.; Paes T.; Pepe I. Medidor de no uniformidad para caracterizar simuladores solares de estado estable de gran superficie. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado 2018.
- Alfonzo J.A.M., Paes T., Pepe I., A. López-Agüera. Selection of Light Source Solar Simulator for different Spectral Distributions Research. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) Volume 6 Issue XII, Dec 2018.
- Alfonzo J.A.M.; Ponte V.; Ribeiro D.; Pepe I. Proposta de automação para holofotes de um simulador solar para caracterização de dispositivos fotovoltaicos. 10º Congresso Internacional de Bioenergia, 2015.

- Alfonzo J.A.M., Paes T., Pepe I., Simulador solar contínuo de grande área a partir de holofotes comerciais e lâmpadas de vapor metálico. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, 2020.
- Costa, E. Desenvolvimento de simulador solar contínuo para teste de estabilização de módulos fotovoltaicos, Journal of Chemical Information and Modeling, 1689–1699, 2017. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Danny H.W. Li, S.W. Lou, Joseph C. Lam. An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation. Energy Procedia 75 (2015) 388 – 393. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.399.
- GALDINO, M. Estado da arte da tecnologia de simuladores solares, Cepel, v. 10899, n. 2006, p. 10, 2014.
- IEC 60904-3. Photovoltaic devices Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. 2008.
- IEC 60904-9. Photovoltaic Device Part 9 - Solar Simulator Performance Requirements. 2007.
- IEC 61215. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval., 2021.
- M. Rahou, A. Mojiri, G. Rosengarten, J. Andrews. Optical design of a Fresnel concentrating solar system for direct transmission of radiation through an optical fibre bundle. Solar Energy 124 (2016) 15–25. DOI: 10.1016/j.solener.2015.11.019
- RIBEIRO, D. B. D. S. Desenvolvimento e teste de conceito de protótipo de iluminador solar contínuo para o visível e ultravioleta, Universidade Federal da Bahia, p. 77, 2014. DOI: 10.1590/s0102-33061995000200011.
- Rocha L.; Cardeal E.; Alfonzo J.A.M.; Paes T.; Silva M.; Pepe I.; Francis D. Análise do estudo de não-uniformidade de um simulador solar de grande área utilizado para caracterização de painéis solares. V SIINTEC 2019.

OPTICAL ENHANCEMENT OF THE STEADY STATE SOLAR SIMULATOR BUILT AT LABSOLAR - UFBA USING OPTICAL SIMULATION

Abstract. *The Certification Laboratory for Photovoltaic Solar Energy System Components (LABSOLAR) at the Institute of Physics of UFBA was built with the aim of providing studies and services for the characterization, certification, and labelling of photovoltaic panels (PV). The laboratory is equipped with the necessary instruments to follow the procedures mentioned in the IEC 61215 standard (2021), which aims to verify whether terrestrial PV modules are suitable for long-term operation in general outdoor climates. One of the developed instruments is the Steady-state solar simulator, whose first version had a BCA qualification regarding spectral matching, non-uniformity, and temporal instability. The test area was 1 m² (0.71m x 1.43m) with an average irradiance of 778 W/m². These conditions were not favourable, as the goal was to conduct tests on 2 m² panels (2m x 1m). This project aimed to improve the optics of the light source to better utilize the illumination provided by the lamps, avoiding losses. By using the Zemax OpticStudio® program to simulate various scenarios and angles we reduced testing time and material waste. The result was a second version of the equipment with a BBA classification capable of illuminating a test area of 2 m² (1.02m x 2.02m) with an average irradiance of 826 W/m². It is using the same number of lamps as the first version. In other words, an increase in efficiency with respect to the area by 100%. The equipment has already been used in verification and certification services by industry clients for the preconditioning of modules, continuously and controlledly providing radiation to reach the 10 kWh/m² specified by the standard. This is the initial step in the sequence of tests that must be conducted for such trials following the Brazilian Labeling Program (PBE) protocol.*

Keywords: *Steady-state Solar Simulator, International Standard IEC, Zemax OpticStudio®, non-uniformity*