

SUNBOX: un simulador solar de Clase AAA y bajo coste

E. López-Fraguas^(1,2), J.M. Sánchez-Pena⁽¹⁾ y R. Vergaz⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas, Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid. Avda. Universidad 30, 28911 Leganés (Madrid)

⁽²⁾ Eduardo López-Fraguas (edlopezf@ing.uc3m.es).

RESUMEN: La caracterización óptica de fotodispositivos es una tarea compleja en términos de equipamiento, más aún si nuestra intención es abordar estudios complejos con una intensidad de luz controlada cuidadosamente e incluso iluminaciones bajo distintas longitudes de onda. De hecho, alcanzar una iluminación estándar, como el conocido espectro AM1.5G usado para caracterizaciones de celdas solares puede ser un gran reto si no podemos adquirir los dispositivos necesarios (principalmente debido al alto coste de estos dispositivos).

En este trabajo, presentamos SUNBOX, nuestro simulador solar propietario de bajo coste, con una categoría AAA según el estándar IEC60904-9. Este dispositivo puede emular el espectro estándar AM1.5G con una desviación inferior al 2% para muestras con un área activa de hasta 1cm². Este simulador solar puede funcionar también como una fuente de luz variable, permitiendo iluminar en hasta 14 longitudes de onda distintas, controlando su intensidad de forma independiente, personalizando así todo el espectro completo.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los métodos de caracterización de los fotodispositivos son un asunto clave para los investigadores e investigadoras. Desde el ya clásico silicio, pasando por los materiales orgánicos y las perovskitas, no importa cual sea el material principal del dispositivo, todos ellos necesitan una buena caracterización. La mayoría de estos métodos se centran en determinar la respuesta optoelectrónica de un dispositivo (por ejemplo, curvas I-V, espectroscopia de impedancias, ancho de banda óptico, etc...).

Todos estos análisis miden la respuesta eléctrica del dispositivo frente a una excitación óptica concreta, que debe ser cuidadosamente controlada. Por ello, el mercado esta lleno de todo tipo de lámparas, tales como xenón, halógenas o LED. Estas lámparas son el componente clave de los simuladores solares, dispositivos comunes que se usan para caracterizar fotodispositivos, regidos por la norma IEC 60904-9 [1].

Comúnmente, los simuladores solares se han construido con lámparas de xenón [2], que requieren una configuración con filtros ópticos de corte o paso-banda para conseguir el espectro AM1.5G, es decir, la irradiancia global en la superficie de La Tierra bajo una masa de aire de 1.5 (100mW/cm²). Su problema son los múltiples inconvenientes que poseen, tales como la inestabilidad temporal (para conseguir una iluminación estable algunas lámparas tienen un tiempo de calentamiento de hasta una hora), la homogeneidad (ya que necesitan óptica auxiliar para conseguir una distribución adecuada) y la durabilidad de la lámpara, ya que estas lámparas tienen un tiempo de vida medio de mil horas aproximadamente.

Para corregir estas desventajas, en los últimos años la tecnología LED ha sustituido a las lámparas de xenón o de haluros metálicos. Esto ha sido así ya que las lámparas LED permiten un control preciso de la luz emitida, son más estables, fiables y tienen un tiempo de vida superior que sus contrapartes.

En este trabajo presentamos SUNBOX, nuestro simulador solar de bajo coste basado en LED, con categoría AAA (más detalles en [3]). Debido a su modularidad, este dispositivo se encuentra bajo un continuo proceso de mejora.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

SUNBOX, como cualquier otro sistema electroóptico, está dividido en hardware y software. La estructura del sistema está impresa completamente usando PLA con una impresora 3D, de una forma modular, para que cualquier parte dañada pueda ser reemplazada con facilidad. En la **Fig.1** se puede observar el sistema completo dividido en cuatro niveles: portamuestras, lámpara, electrónica de potencia y electrónica de control, cada una descrita en las siguientes subsecciones.

2.1. Portamuestras (Nivel 0)

Es la base de la torre, en la que se coloca la muestra. Debido a la modularidad del sistema, disponemos de distintos portamuestras, adaptándose cada uno a unas necesidades distintas dependiendo de la muestra a analizar.



Fig. 1: Foto de SUNBOX. Toda su estructura está impresa en 3D.

2.2. Lámpara (Nivel 1)

La tarjeta de circuito impreso (PCB) que contiene el array de LEDs es el núcleo de esta sección. Estos LEDs se han elegido cuidadosamente después de un proceso de simulación usando el software MATLAB, para conseguir una correcta homogeneidad e intensidad espectral sobre la muestra. La simulación tiene en cuenta la emisión de los LEDs y su disposición geométrica en el plano espacial. En la **Fig.2** se observa el espectro simulado de SUNBOX y el experimental una vez construido el sistema, ambos configurados para emitir el espectro AM1.5G, que también se muestra (el espectro de El Sol siguiendo la norma, también conocido como un sol).

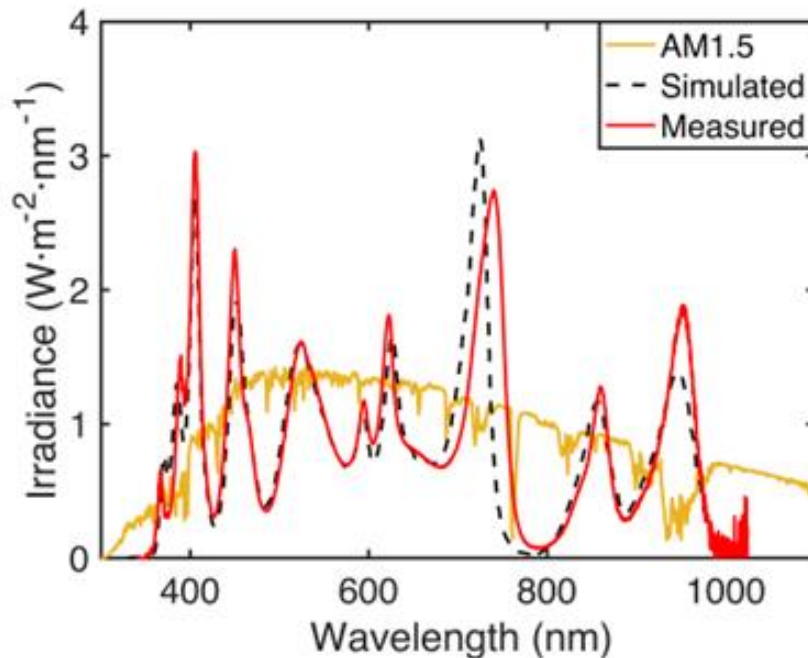


Fig. 2: Comparación del espectro simulado y el medido experimentalmente de SUNBOX frente al estándar AM1.5G.

Todos los LEDs están agrupados electrónicamente en función de su longitud de onda de emisión, de forma tal que la intensidad de corriente que circula por ellos puede ser controlada de forma independiente.

Cuando la lámpara genera un sol de potencia, también produce calor, el cual debe ser disipado para evitar daños en la lámpara. Para ello, cada LED tiene una vía de disipación térmica trazada con cobre en la PCB, que conduce el calor hasta un disipador, el cual está refrigerado por ventilación forzada con un ventilador de 12V. De esta forma conseguimos una estabilidad demostrada mediante una prueba de fatiga de más de 360 horas trabajando de modo continuo en niveles de iluminación de un sol, manteniendo la temperatura y la emisión adecuada.

2.3. Electrónica de potencia (Nivel 2)

Toda la administración de la potencia eléctrica del sistema se realiza aquí. Esta PCB está encargada de proveer con la potencia adecuada a cada conjunto de LEDs que forma la lámpara. Para conseguir esto con la máxima eficiencia posible, se han diseñado controladores dedicados para cada grupo de LEDs (agrupados según su longitud de onda de emisión) de forma óptima. Los controladores están basados en convertidores digital analógico (DACs) y convertidores de potencia CC/CC, con el acondicionamiento adecuado para comportarse como una fuente ajustable de corriente para los LEDs.

La eficiencia depende de la potencia consumida por los LEDs, pero incluso en el peor de los casos el sistema tiene una eficiencia superior al 85%, como se puede ver en la **Tabla 1**.

Longitud de onda (nm)	Corriente circulante (mA)	Potencia de entrada (W)	Potencia de salida (W)	Eficiencia (%)
540	50	1.27	1.17	92.13
	100	2.69	2.41	89.59
	150	4.24	3.79	89.39
650	50	1.25	1.15	92.00
	100	2.65	2.39	90.19
	150	4.13	3.72	90.07
567	120	0.74	0.65	87.84
	240	1.54	1.32	85.71
	350	2.15	1.84	85.58

Tabla 1: Eficiencia electrónica de los controladores.

2.4. Electrónica de control (Nivel 3)

En la parte superior del sistema, se encuentra posicionado el microcontrolador Arduino Uno. Con este asequible microprocesador se controlan todas las señales del dispositivo. El Arduino está programado con Lynx, un add-on de LabVIEW que permite programar este microcontrolador. De esta forma, el sistema completo se controla con una amigable interfaz de usuario de LabVIEW (ver Fig. 3) que dispone de varias funcionalidades.

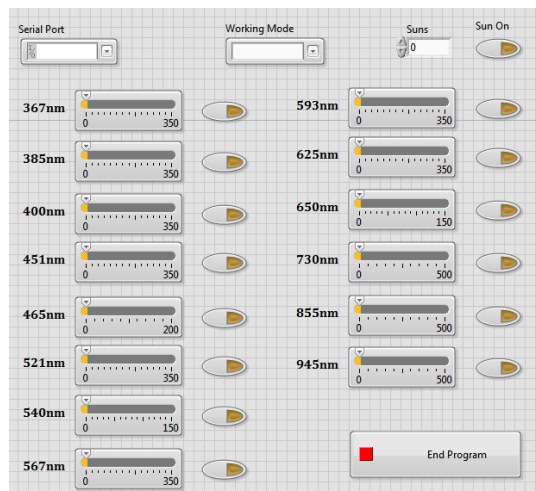


Fig. 3: La interfaz de usuario de SUNBOX, desarrollada con LabVIEW.

En esta interfaz debemos señalar el puerto serie al que SUNBOX se conecta en el ordenador, y después seleccionar el modo de trabajo. Actualmente dispone de dos modos: "Custom" y "Sol" (funcionalidad introducida después de [3])

En el modo "Sol", solo tenemos que introducir el número de soles que queremos aplicar a nuestra muestra y SUNBOX hará los cálculos necesarios para otorgar los niveles de irradiancia adecuados. Esta funcionalidad ha sido comprobada entre valores de 0.1 soles y 1.2 soles. Se

requiere una caracterización más profunda para analizar los valores límite en los que el espectro se empieza a distorsionar.

En el modo “Custom”, podemos seleccionar la corriente que queremos que circule a través de cada grupo de LEDs de forma independiente, además de encender o apagar solo los que consideramos adecuados para nuestro estudio. Por ejemplo, esta funcionalidad nos permite analizar la respuesta de un fotodispositivo frente a una longitud de onda concreta o un conjunto de ellas.

Actualmente estamos trabajando en un modo frecuencial en el cual podamos seleccionar no solamente la longitud de onda si no también una frecuencia para poder emitir una luz pulsada en lugar de continua. Esta medida es muy útil para medir el ancho de banda de un fotodiodo, por ejemplo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema está dimensionado acorde al cumplimiento de la norma IEC 60904-9, consiguiendo una clase AAA. Esta categoría evalúa tres parámetros diferentes: el acoplamiento espectral, la no uniformidad de la irradiancia en el plano de la medida y la inestabilidad temporal de la irradiancia, dividida en corto plazo (STI) y largo plazo (LTI). Todos ellos se explican en las siguientes subsecciones.

3.1. Acoplamiento espectral

Para conseguir una clase A en este apartado, la irradiancia integrada en los intervalos de longitud de onda propuestos no debe desviarse más de un $\pm 25\%$ comparándola con el espectro AM1.5G. En la **Tabla 2** podemos ver que el sistema se encuentra muy por debajo de esta desviación en todos los intervalos (incluido de 300nm a 400nm, intervalo originalmente excluido de la normativa)

Intervalo espectral	Medida (mW/cm ²)	AM1.5G (mW/cm ²)	Desviación
300-400nm	4.57	4.64	-1%
400-500nm	14.69	14.09	4%
500-600nm	15.53	15.25	2%
600-700nm	15.46	14.06	10%
700-800nm	13.03	11.44	14%
800-900nm	8.17	9.54	-14%
900-1100nm	11.78	12.15	-3%
Total Irradiance	83.24	81.18	3%

Tabla 2: Acoplamiento espectral de las medidas frente al estándar AM1.5G.

3.2. No uniformidad de la irradiancia en el plano de medida

Este apartado evalúa la desviación entre los valores máximos y mínimos de irradiancia en una superficie fija. Nuestro sistema tiene una desviación del 1.77% para un área igual o inferior a 1x1 cm². Para conseguir la Clase A, este valor debe de ser inferior al 2%, por lo que nuestro sistema cumple.

3.3. Inestabilidad temporal a corto (STI) y largo plazo (LTI).

Con este parámetro, obtenemos las fluctuaciones que tendrá nuestra lámpara, debidas por ejemplo a la temperatura, que afectarán a la cantidad de luz que esta emite. Para calcularla, se

mide el valor de irradiancia más alto y bajo en el periodo temporal de interés. En la **Tabla 3** se pueden observar los resultados, siendo el tiempo de evaluación de la STI un segundo y el de la LTI 5 minutos.

Ronda	STI (Sin calentamiento)	LTI (Sin calentamiento)	LTI (60 s calentamiento)
1	0.38 %	0.8512%	0.4511%
2	0.4473 %	1.2338%	0.4386%
3	0.3544 %	1.2471%	0.4516%
4	0.3086 %	1.3847%	0.4958%
5	0.1523 %	1.3166%	0.4541%
Media	0.3284 %	1.2067%	0.4582%

Tabla 3: Resultados experimentales de las medidas STI y LTI.

El requisito exigido para la clase A es obtener valores por debajo del 0.5% de inestabilidad a corto plazo, cosa que se consigue para la STI. Para conseguirlo también en LTI es necesario obtener valores por debajo del 2%, requisito que también se cumple. Aún así, si se quiere disminuir este factor aún más, se puede hacer un calentamiento del sistema de un minuto y con ello conseguir que la LTI baje incluso del 0.5%

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presenta SUNBOX, un simulador solar de clase AAA. El dispositivo está construido en torno a una estructura modular de plástico PLA realizada con una impresora 3D, lo cual le otorga resistencia y reduce su coste. Todo el diseño de la electrónica es propietario y los componentes son comerciales (“off-the-shelf”). A diferencia de otros disponibles en el mercado, este simulador solar solo utiliza fuentes de luz LED, mucho más eficientes, estables y fiables que otros tipos de fuentes tales como lámparas halógenas o de xenón. Esto evita el conocido tiempo de calentamiento o de estabilización de hasta 60 minutos de este tipo de lámparas, consiguiendo una luz homogénea y estable con un tiempo de calentamiento de en torno a un minuto. Con un cuidadoso diseño en la disposición de los LEDs, se ha conseguido una distribución homogénea de la máxima categoría sin usar ningún tipo de elemento óptico (tales como colimadores, lentes, filtros, etc...), por lo que la calibración es más sencilla y el sistema es mucho más robusto frente a golpes y desplazamientos que en otro caso podrían provocar desalineamientos ópticos.

El sistema se controla usando una sencilla interfaz de usuario diseñada con el software LabVIEW, permitiendo al operador hacer diversos análisis, desde una iluminación estándar bajo el espectro de un Sol, hasta medidas realizadas ad-hoc configurando independientemente la potencia emitida en cada una de las 14 longitudes de onda configurables.

La fiabilidad del simulador solar ha sido confirmada de diversas maneras, una de ellas ha sido una prueba de fatiga en la que se dejó al sistema funcionando durante más de 360 horas otorgando la potencia de un Sol sin sufrir ningún tipo de daño. Esto se consigue debido al eficiente diseño de evacuación de calor, que mantiene la placa de LEDs por debajo de 40°C en todo momento, evitando problemas de estrés térmico y altas temperaturas.

5. REFERENCIAS

- [1] N. Taylor, “*Equipment and basis of power measurements*”, Guidelines for PV Power Measurement in Industry, 1st edition, ch. 3, pp. 23-30, 2010.
- [2] V. Esen, S. Saglam, and B. Oral, “*Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review*”, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 77, pp. 1240-1250, 2017.

- [3] E. López-Fraguas, J.M. Sánchez-Pena, R. Vergaz, “A Low-Cost LED-Based Solar Simulator”, IEEE Trans. Instrum. Meas., Early Access, pp. 1-11, 2019.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, ref. TEC2016-77242-C3-1-R Grant (AEI/FEDER, fondos UE), y por la Comunidad de Madrid y el programa FEDER a través de los consorcios SINFOTON-CM (ref. S2013/MIT-2790) y SINFOTON2-CM (ref. S2018/NMT-4326). El trabajo de E. López-Fraguas ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Formación Profesional a través de un contrato predoctoral FPU (ref. FPU17/00612).