

## CELIDAS SOLARES DE PEROVSKITAS PARA USOS EN DISPOSITIVOS MÓVILES Y APLICACIÓN EN INTERIORES

Victoria A. Gómez Andrade<sup>1,2</sup>, Nina Bonnet<sup>1,3</sup>, Manuel Racca<sup>1,3</sup>, Camila Colomb<sup>1,3</sup>,  
Micaela Perez<sup>1</sup>, Francisco N. Calderón Acosta<sup>1</sup>, Martha Díaz Salazar<sup>2,4</sup>, M. Dolores Perez<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento Física de la Materia Condensada – Centro Atómico Constituyentes - GIYA – CNEA

<sup>2</sup>Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (INN) – CONICET - CNEA

<sup>3</sup>Departamento de Física – FCEyN – UBA

<sup>4</sup>Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes - GIYA – CNEA

Tel. 011-6772-7129 e-mail: [mariadoloresperez@cnea.gov.ar](mailto:mariadoloresperez@cnea.gov.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar y evaluar celdas solares de perovskita para aplicaciones fotovoltaicas en interiores, con potencial uso en dispositivos portátiles y sistemas IoT. Se estudiaron dos composiciones activas, MAPI y triple catión, caracterizando espectralmente dos lámparas LED de baja potencia (RB y MW) y fabricando celdas en configuración n-i-p mediante un método de un solo paso. La morfología de las películas se analizó por microscopía electrónica de barrido, y el desempeño fotovoltaico se evaluó mediante curvas  $J-V$  bajo iluminación estándar AM 1.5G y en condiciones de baja irradiancia (200–1000 lux). Los resultados evidenciaron que ambas perovskitas logran eficiencias de conversión de potencia superiores a las medidas a 1 sol, atribuibles a su buena adaptación espectral a fuentes artificiales y baja recombinación no radiativa. La composición MAPI presentó mayores eficiencias globales gracias a su mayor fotocorriente y tamaño de grano, mientras que la de triple catión se vio limitada por menores factores de forma. Las lámparas RB ofrecieron un mejor desempeño que las MW, destacando la importancia del espectro de emisión. En conclusión, estas celdas muestran un alto potencial para alimentar dispositivos autónomos y optimizar la recolección de energía en entornos de baja iluminación.

**Palabras clave:** celdas solares de perovskita, iluminación de interiores, IoT

### INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovable constituye un desafío central para enfrentar la crisis climática y diversificar las matrices energéticas a nivel global. En este contexto, las celdas solares de perovskita (CSP) han emergido como una tecnología fotovoltaica de vanguardia, con eficiencias de conversión superiores al 25% y con un potencial de fabricación a bajo costo en comparación con tecnologías convencionales basadas en silicio (Song et al., 2017 y Guo et al., 2017). Su alta versatilidad y compatibilidad con procesos de baja temperatura y bajo consumo energético las posicionan como una alternativa estratégica para ampliar el acceso a la generación eléctrica limpia y descentralizada.

Por otra parte, el internet de las cosas, “*Internet of Things*” IoT es un sistema de dispositivos informáticos conectados a Internet, máquinas mecánicas y digitales, objetos o incluso animales o personas que portan identificadores únicos que pueden recopilar y transferir datos a través de una red sin necesidad de interacciones de persona a persona o de persona a computadora. Con una estimación de alrededor de 75 mil millones de dispositivos IoT para 2025, (Mathews et al., 2019 y Guo et al., 2023) se prevé que IoT se expanda rápidamente en los próximos años. Dado que la mayoría de los sensores de IoT funcionan a través de redes inalámbricas, la creación de un sistema de energía fuera de la red permitirá una fácil integración de los sensores y puede reducir los costos de instalación. Las baterías son ahora la principal fuente de energía portátil para los sensores de IoT, pero cargar y reemplazar las



baterías generalmente conduce a un mayor consumo de energía y perturbaciones en la transferencia de datos. En este sentido, los dispositivos fotovoltaicos de interiores o “*indoor photovoltaics*” (IPV, por sus siglas en inglés) móviles, utilizan de manera eficiente la luz artificial en espacios donde no se puede aprovechar la luz solar (oficina, casa, entre otras). La energía generada por la IPV puede suministrar energía confiable y permitir comunicaciones fluidas en redes inalámbricas de IoT.

Las celdas solares de perovskitas se están consolidando como las candidatas más prometedoras para aplicaciones fotovoltaicas en interiores por diversas razones fundamentales. En primer lugar, presentan una excelente capacidad de adaptación espectral a las fuentes de luz artificial comunes en ambientes interiores —como LED y lámparas fluorescentes—, lo que les permite mantener altos niveles de eficiencia bajo condiciones de baja irradiancia (Guo et al., 2023 y Wang et al., 2021). Además, sus altos coeficientes de absorción y su capacidad para funcionar eficientemente a tensiones más altas en comparación con otras tecnologías, como las celdas orgánicas o de silicio amorfo, las posicionan como una opción técnicamente ventajosa (Lee et al., 2019 y Kim et al., 2019).

Por otro lado, las perovskitas pueden ser procesadas mediante técnicas de bajo costo y temperatura relativamente baja, lo cual es compatible con sustratos flexibles y favorece su integración en dispositivos portátiles, sensores IoT y otros sistemas electrónicos de baja potencia (Wojciechowski et al., 2022). Esta versatilidad en el diseño y fabricación también abre la puerta a aplicaciones comerciales emergentes, como etiquetas inteligentes, sistemas de monitoreo autónomos y dispositivos electrónicos autosuficientes (Mathews et al., 2019).

Finalmente, su rápido desarrollo científico ha permitido superar en poco tiempo muchas de las limitaciones iniciales en términos de estabilidad y toxicidad, gracias a avances en encapsulado, composiciones libres de plomo y estructuras arquitectónicas más robustas (Pecunia et al., 2021). Todo esto convierte a las perovskitas en una plataforma tecnológicamente atractiva y económicamente viable para el desarrollo de soluciones fotovoltaicas eficientes y sostenibles en entornos interiores.

El estudio de las celdas solares para el aprovechamiento de iluminación interior resulta cada día más relevante por lo que muchos grupos de investigación a nivel mundial se vuelcan a esta línea de trabajo. Diversos tipos de dispositivos fotovoltaicos diseñados para IPVs han sido reportados, con respuesta a fuentes de luz artificial de distintas intensidades y espectros de emisión. A diferencia de las celdas solares para exteriores, que se evalúan bajo una condición estándar bien definida (AM1.5G, 100 mW/cm<sup>2</sup>), los IPVs carecen hasta el momento de un protocolo de medición estandarizado. En su lugar, se han empleado múltiples fuentes lumínicas para estimar la eficiencia de conversión de potencia (PCE) en estos dispositivos (Li et al., 2015). En este contexto, el desarrollo de metodologías precisas y reproducibles para la caracterización de IPVs resulta esencial para una evaluación confiable de su desempeño.

En este trabajo inicialmente presentaremos la caracterización sistemática de las lámparas utilizadas para la posterior caracterización de las celdas solares en condiciones de iluminación en interiores. Para el estudio de la eficiencia de las celdas bajo condiciones de interior se adquirieron dos lámparas de baja potencia denominadas RB y MW por sus siglas en inglés (*blue-red* y *mint-white*, respectivamente). Estas lámparas son comúnmente utilizadas para los cultivos en invernaderos debido a la mejor respuesta fotosintética de las plantas. En estos entornos, donde se requiere ventilación forzada para el control térmico, se plantea la posibilidad de aprovechar la energía lumínica residual para alimentar ventiladores mediante celdas fotovoltaicas, optimizando así el rendimiento energético del sistema global.

Asimismo, se presentará el desarrollo de celdas solares de perovskitas implementando dos materiales de naturaleza diferente, MAPbI<sub>3</sub> y Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.83</sub>MA<sub>0.17</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.83</sub>Br<sub>0.17</sub>)<sub>3</sub>. Se presentará la respuesta de ambos dispositivos bajo iluminación estándar AM1.5G y bajo iluminación artificial de baja potencia (200-1000lux).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estudio de las lámparas de interior

Los espectros de las lámparas RB y MW fueron medidos paralelamente con el luxómetro y el espectrómetro de manera de calibrar la potencia de las lámparas para la distinta iluminancia expresada en cantidad de “lux”. En la Figura 1a se presentan los espectros normalizados de ambas lámparas y en la Figura 1b se presenta la correlación entre iluminancia y potencia obtenida al integrar cada espectro para las distintas intensidades de iluminación. Para ambas lámparas se observa una correlación lineal de la irradiancia con la iluminancia. Cabe destacar que, para un mismo valor de iluminancia, la lámpara RB ofrece mayor potencia que la MW debido principalmente a las diferencias en la zona de respuesta del luxómetro. El rango de máxima respuesta del luxómetro utilizado se encuentra en 500-600nm que es precisamente la zona de mayor intensidad de la lámpara MW y donde la lámpara RB tiene un mínimo. Es por esto que, el luxómetro como instrumento, tiende a subestimar la potencia de la lámpara RB debiendo aumentar la potencia de esta para obtener la misma iluminancia.

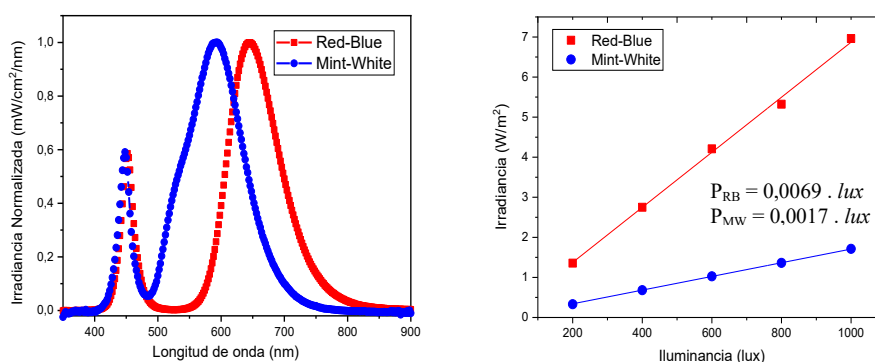


Figura 1: a) Espectros de las lámparas RB y MW; b) calibración de la irradiancia correspondiente para cada valor de iluminancia de ambas lámparas.

### Celdas solares de perovskitas

Se fabricaron celdas solares de perovskitas en la configuración n-i-p utilizando MAPbI<sub>3</sub> y Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.83</sub>MA<sub>0.17</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.83</sub>Br<sub>0.17</sub>)<sub>3</sub> como materiales ópticamente activos según el procedimiento descrito en la sección experimental. La estructura de celda se presenta como en el esquema de la Figura 2a. Por simplicidad, de aquí en más se denominará “MAPI” y perovskita “triple catión” a ambos materiales respectivamente. El desempeño de estas bajo iluminación estándar AM1.5G está presentada en la Figura 2b donde se observa la respuesta *J-V* de las celdas iluminadas.

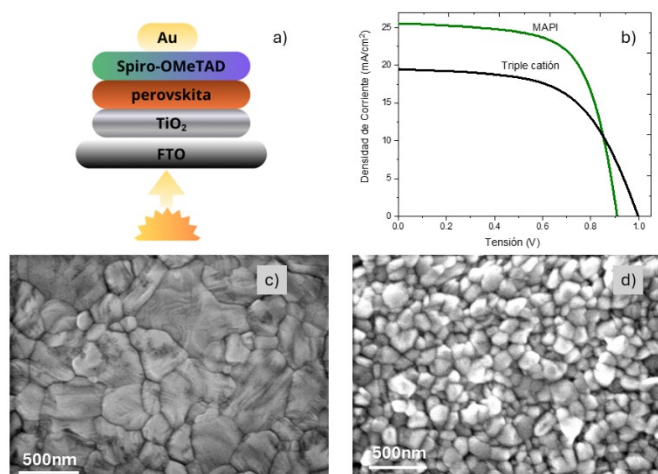


Figura 2: a) Esquema: Estructura de capas de las celdas solares b) Curvas *J-V* bajo iluminación estándar AM1.5G a potencia de 1 sol de irradiancia de celdas solares empleando perovskitas MAPI y triple catión. Imágenes SEM de la superficie superior de las películas de perovskita. c) MAPI d) Triple catión

Tabla 1: Parámetros eléctricos de las celdas extraídos de la respuesta  $J$ - $V$  bajo 1 sol de iluminación estándar AM1.5G para ambos materiales de perovskita.  $V_{oc}$ : tensión de circuito abierto;  $J_{sc}$ : corriente de cortocircuito;  $FF$ : factor de forma;  $PCE$ : eficiencia de fotoconversión.

Perovskita	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$FF$ (%)	$PCE$ (%)
MAPI	0,91	25,60	66,32	15,37
Triple catión	0,99	19,50	58,57	11,30

La celda de perovskita MAPI presenta una eficiencia significativamente superior a la de triple catión, atribuible principalmente a su mayor fotocorriente. Aunque la tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de la celda de triple catión es más elevado y cercano a 1 V, este incremento se produce a expensas de una reducción en el factor de forma ( $FF$ ), consecuencia de una mayor resistencia en serie y de un aumento en los procesos de recombinación. Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM), mostradas en las Figuras 2c y 2d, revelan que el tamaño de grano de la perovskita MAPI ( $\approx 400$  nm) es sustancialmente mayor que el de la perovskita de triple catión ( $\approx 200$  nm). Esta diferencia se asocia a la mayor sensibilidad de la síntesis de la perovskita de triple catión a la humedad ambiente, lo que dificulta la obtención de películas de alta calidad y mayor tamaño de grano. Un menor tamaño cristalino implica una mayor área superficial y, en consecuencia, un mayor número de defectos en los bordes de grano. Dichos defectos actúan como centros de recombinación no radiativa, reduciendo la cantidad de fotoportadores colectados y, por ende, la corriente de cortocircuito ( $J_{sc}$ ), lo que repercute negativamente en la eficiencia de conversión de potencia. Siendo que las bandas prohibidas de ambos materiales resultan en valores muy similares (1,59 y 1,61 eV para MAPI y Triple Catión respectivamente) no podemos concluir que la diferencia en la mayor fotocorriente se deba a las propiedades electrónicas de los materiales sino a las características morfológicas que facilitan la colección de portadores en lugar de su generación.

#### **Respuesta de las celdas bajo iluminación de interiores**

Ambos dispositivos fotovoltaicos fueron evaluados bajo condiciones de iluminación interior utilizando las lámparas RB y MW previamente descritas, variando la intensidad de iluminación incidente. Las curvas  $J$ - $V$  correspondientes se presentan en la Figura 3: las partes (a) y (b) muestran los resultados para la celda con perovskita MAPI, mientras que las partes (c) y (d) corresponden a la celda con perovskita triple catión. Los parámetros fotovoltaicos extraídos de estas curvas se resumen en las Tablas 2 y 3, para ambas composiciones y tipos de lámpara.

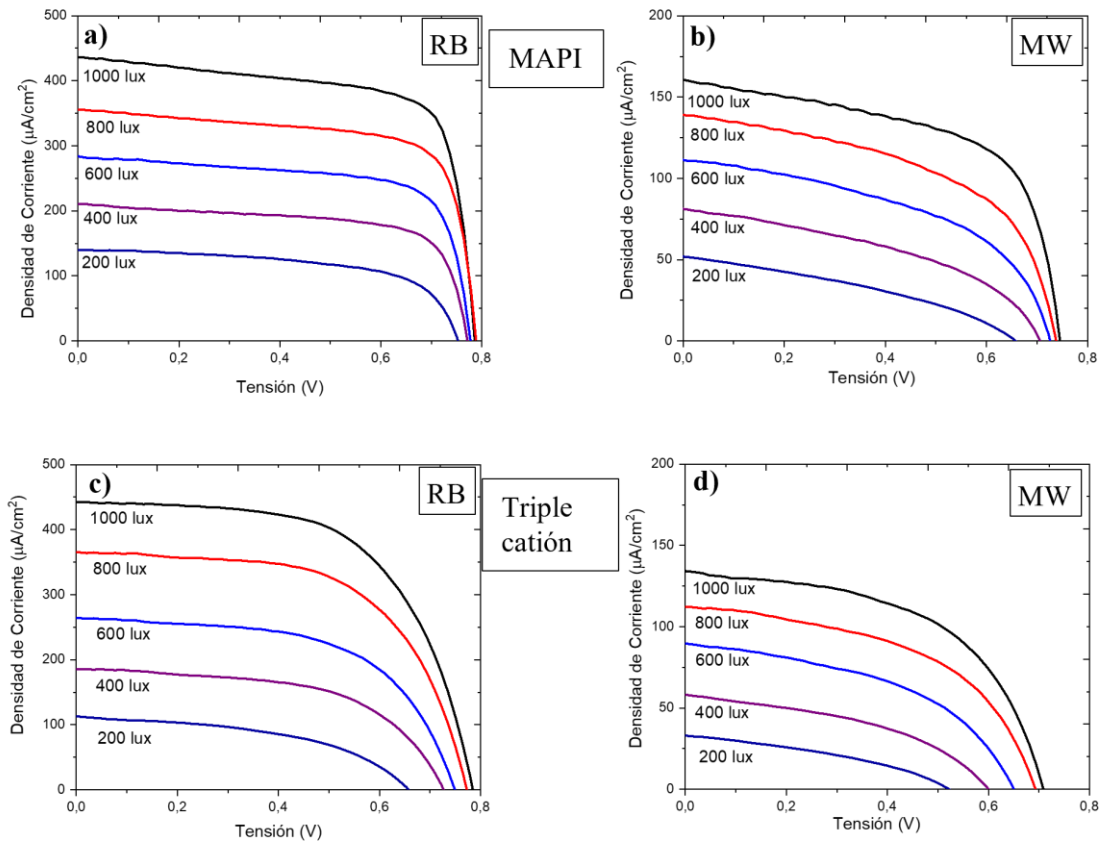


Figura 3: Curvas densidad de corriente vs. tensión para distintos niveles de iluminación. a) Celda MAPI bajo iluminación con lámpara RB, b) Celda MAPI bajo iluminación con lámpara MW, c) Celda Triple Cation bajo iluminación con lámpara RB, d) Celda Triple Cation bajo iluminación con lámpara MW.

Se observa que, bajo cualquier condición de iluminación interior, las eficiencias de conversión de potencia (PCE) de ambas perovskitas superan ampliamente a las registradas bajo la irradiancia estándar de un sol (AM1.5G, 100 mW/cm<sup>2</sup>). Este comportamiento se atribuye principalmente a la alta movilidad de portadores de carga en condiciones de bajo flujo fotónico (Kumari et al., 2024, Kang et al., 2024), favorecida por la baja densidad de defectos y la limitada recombinación no radiativa. Asimismo, las perovskitas muestran una respuesta espectral más adecuada en el rango de emisión de las fuentes de iluminación interior, siendo esta más favorable bajo la lámpara RB que bajo la lámpara MW.

El espectro de la fuente lumínica influye directamente en el factor de forma (FF) de las celdas solares, al modificar los procesos de recombinación y transporte de portadores en el dispositivo. Bajo la lámpara RB, cuyo espectro presenta máximos coincidentes con las bandas de absorción de la perovskita, el FF tiende a incrementarse. Esto se explica porque las longitudes de onda óptimas favorecen tanto la generación como la extracción eficiente de portadores de carga, reduciendo las pérdidas por recombinación.

En contraste, el espectro más amplio de la lámpara MW incluye longitudes de onda menos eficientemente absorbidas o que promueven mayores procesos de recombinación, lo cual conduce a una disminución del FF. En consecuencia, la distribución energética de iluminación afecta el equilibrio entre la generación y la recombinación de portadores, alterando la forma de la curva  $J-V$  y reduciendo el FF. Si bien la lámpara RB emite una mayor potencia radiante, al comparar condiciones de iluminancia equivalente (lux) se observa en general una respuesta superior de las celdas bajo esta fuente, reflejada en factores de forma más altos respecto a los obtenidos con la lámpara MW. En este último caso, la reducción del FF impacta negativamente en la eficiencia global.

En particular, la celda con perovskita MAPI exhibe un incremento de eficiencia desde 35,85 % hasta 48,49 % al disminuir la iluminancia de 1000 a 200 lux bajo la lámpara RB. Sin embargo, esta tendencia se invierte con la lámpara MW, donde la eficiencia desciende de 43,03 % a 38,84 % al reducir la irradiancia. En el caso de la celda con perovskita de triple catión, la eficiencia decrece con la iluminancia para ambas lámparas, siendo la disminución más pronunciada bajo la fuente MW, fenómeno asociado principalmente a la reducción del  $V_{oc}$ . La correlación entre el  $V_{oc}$  y, por consiguiente, los procesos de recombinación con los diferentes espectros de las lámparas, así como la influencia de la irradiancia emitida, requiere un análisis más profundo que considere el campo óptico en las capas constitutivas, la movilidad de portadores y las pérdidas resistivas tanto en el volumen (*bulk*) como en las interfaces.

Por otro lado, la densidad de corriente de cortocircuito muestra una dependencia lineal con la intensidad de iluminación, como se puede apreciar en la Figura 4. Existe una correlación directa entre la potencia radiante (en  $W/m^2$ ) y el valor absoluto de  $J_{sc}$ . Por ejemplo, una irradiancia de  $1,38 W/m^2$  (correspondiente a 200 lux con la lámpara RB) genera una  $J_{sc}$  de  $0,143 mA/cm^2$ , mientras que  $1,7 W/m^2$  (equivalente a 1000 lux con la lámpara MW) da lugar a una  $J_{sc}$  de  $0,162 mA/cm^2$ . Esto indica que, a potencias comparables, ambas fuentes de iluminación generan corrientes similares, validando la linealidad del comportamiento fotoeléctrico en el régimen de baja iluminación.

Tabla 2: Parámetros de celda extraídos de la respuesta  $J$ - $V$  bajo distintas potencias de iluminación de las lámparas RB y MW de la celda solar conteniendo perovskita MAPI.

Lámpara	LUX	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	$FF$ (%)	PCE (%)
RB	1000	0,779	0,440	72,77	35,85
	800	0,779	0,359	73,50	38,61
	600	0,765	0,287	71,75	37,46
	400	0,765	0,212	70,52	41,53
	200	0,737	0,143	62,65	48,49
MW	1000	0,737	0,162	61,88	43,03
	800	0,737	0,140	54,87	41,43
	600	0,723	0,113	53,70	42,54
	400	0,709	0,082	47,32	40,25
	200	0,653	0,052	37,81	38,84

Tabla 3: Parámetros de celda extraídos de la respuesta  $J$ - $V$  bajo distintas potencias de iluminación de las lámparas RB y MW de la celda solar conteniendo perovskita triple catión.

Lámpara	LUX	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	$FF$ (%)	PCE (%)
RB	1000	0,779	0,445	61,16	30,46
	800	0,765	0,368	61,40	32,49

	600	0,737	0,266	59,90	27,86
	400	0,723	0,187	57,53	28,29
	200	0,653	0,113	48,90	26,67
MW	1000	0,695	0,134	55,89	30,42
	800	0,695	0,115	50,97	29,85
	600	0,638	0,090	48,05	26,82
	400	0,596	0,059	43,29	22,22
	200	0,512	0,033	39,26	20,02

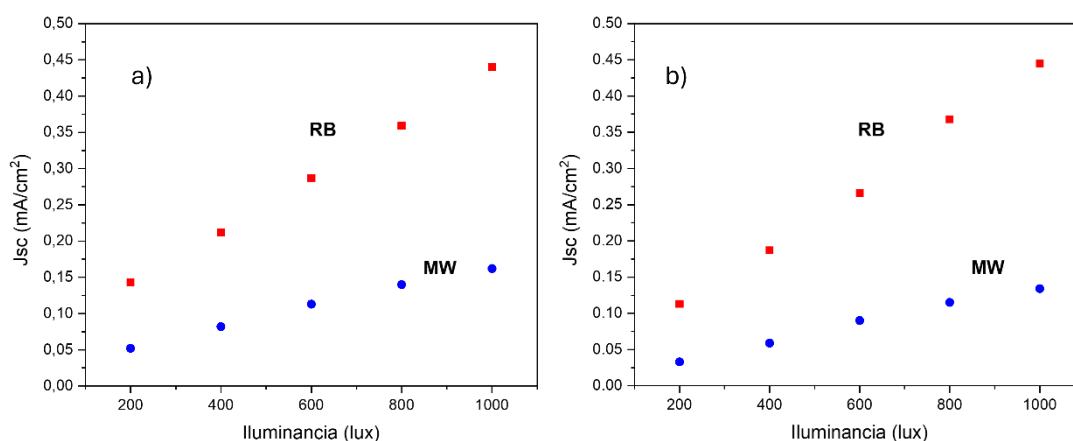


Figura 4: Dependencia de la corriente de cortocircuito con la iluminancia expresada en lux para ambas lámparas. a) celda solar conteniendo MAPI y b) celda solar conteniendo perovskita de triple catión.

El desarrollo de celdas solares de perovskita para aplicaciones en interiores ha avanzado, a su vez, más rápidamente que el destinado a operación en exteriores. (Dagar et al., 2018, Cheng et al., 2019, Le et al., 2024, Muhammad et al., 2022 y Dong et al., 2019) No obstante, los resultados no siempre son fácilmente comparables debido a las diferentes condiciones de medida, tales como la iluminancia (200–1000 lx) y el espectro (LED de luz blanca con distintas temperaturas de color o lámparas fluorescentes) (Lübke et al., 2021). El dispositivo mejor certificado hasta la fecha alcanzó una PCE del 44,7 % bajo 1000 lx ( $338,2 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) de una lámpara fluorescente U30, (Ma et al., 2024) atribuida a una pasivación dual mediante una solución de yoduro de oleilamonio en cloroformo. Otro dispositivo de alta eficiencia se desarrolló mediante pasivación doble con aditivos basados en guanidinio y feniletilamina, alcanzando una PCE del 40,1 % bajo LED blanco cálido con 824,5 lux ( $301,6 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) (He et al., 2021). Los dispositivos reportados por Li et al. lograron 42,1 % y 39,2 % al ser iluminados con LED blanco de 3000 K bajo 1000 lux ( $280 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) y 500 lux, respectivamente (Li et al., 2024). En nuestro trabajo, fabricamos dispositivos en arquitectura n-i-p (vidrio/FTO +  $\text{TiO}_2$  mesoporosa como capa electrónica, perovskita como capa activa (MAPI o triple catión), Spiro-MeOTAD como HTL y Au como electrodo) y caracterizamos espectralmente dos lámparas LED de baja potencia (denominadas RB y MW) para correlacionar iluminancia con potencia de iluminación; con esta metodología demostramos que, además de la iluminancia, la composición espectral tiene un papel crítico en el desempeño. Bajo iluminación interior nuestros dispositivos alcanzaron eficiencias de conversión de potencia muy superiores a las medidas bajo 1 sol (%PCE AM1.5G : MAPI 15,37 %; triple catión 11,30 %), siendo la MAPI la que

presentó el mejor comportamiento global, alcanzando hasta 48,49 % de PCE a 200 lux con la lámpara RB (y 35,85 % a 1000 lux con RB; 43,03 % a 1000 lux con MW), mientras que la perovskita triple catión mostró valores máximos del orden de 32,5 % (32,49 % a 800 lux con RB) y  $\approx 30,4$  % a 1000 lux con ambas fuentes. Estos resultados se correlacionan con diferencias morfológicas (MAPI mostró granos  $\approx 400$  nm frente a  $\approx 200$  nm del triple catión) y con un mayor factor de forma y  $J_{sc}$  bajo la lámpara RB, lo que evidencia la importancia de un diseño de perovskita y de la armonización de condiciones de medida (tipo de fuente, espectro y forma de reportar la irradiancia) para lograr comparaciones fiables y un desempeño óptimo en aplicaciones interiores.

## MÉTODOS EXPERIMENTALES

### *Fabricación de celdas solares*

Los sustratos de vidrio/FTO (TEC™ 7, MSE Supplies) se limpiaron con un detergente alcalino acuoso en ultrasonido durante 10 min y posteriormente se sumergieron en una mezcla 1:1 de etanol e isopropanol. Los sustratos se trataron con plasma de microondas durante 5 s. Sobre los sustratos limpios se depositaron 50  $\mu\text{L}$  de una solución de BL solanorix. El depósito se realizó por *spin coating* a 2000rpm/10s y 5000rpm/20s y se realizó un tratamiento térmico a 550°C/1hora. A continuación, se depositó una capa mesoporosa de  $\text{TiO}_2$  mediante *spin coating* a 2000rpm/10s y 5000rpm/20s, utilizando 60  $\mu\text{L}$  de una solución de  $\text{TiO}_2$  nanocristalino (600uL de la solución madre/1.5ml Etanol), se sinterizó a 550°C por 30min.

Las películas de perovskita se fabricaron mediante el método de un solo paso, empleando una relación estequiométrica de los precursores  $\text{PbI}_2$ , MAI, FAI,  $\text{PbBr}_2$ , MABr y CsI para cada caso. Los reactivos se disuelven en una mezcla solvente DMF:DMSO en una relación 9:1.

La solución precursora de perovskita se depositó sobre la capa de  $\text{TiO}_2$  mediante *spin coating* a 4000 rpm durante 50 s, aplicando clorobenceno como antisolvente durante el giro. Finalmente, las películas se recocieron a 100 °C durante 2 min. Durante el depósito, la humedad relativa dentro de la cámara de *spin coating* se redujo utilizando aire seco.

Para la capa transportadora de huecos se utilizó una solución compuesta por 91,1 mg de Spiro-MeOTAD disueltos en 35,93  $\mu\text{L}$  de *tert*-butilpiridina (Sigma Aldrich), 17,5  $\mu\text{L}$  de una solución madre de sal Li-TFSI (520 mg/mL, Sigma Aldrich) y 8,93  $\mu\text{L}$  de una solución madre de Co (FK209 Co (III)TFSI) (15mg/40 $\mu\text{L}$ ) disuelta en 1 mL de clorobenceno y acetonitrilo (Merck). Esta solución se depositó sobre la perovskita por *spin coating* a 3000 rpm durante 20 s. Finalmente, se depositaron 130 nm de oro mediante evaporación térmica en alto vacío ( $P_{\text{back}} = 10^{-6}$  torr) a una velocidad constante de 5 nm/s.

### *Caracterización*

Para la medición de la irradiancia espectral de distintas las lámparas se empleó un espectrorradiómetro FieldSpec® 4 Standard-Res (ASD Inc., USA), un equipo portátil de alta precisión diseñado para mediciones de reflectancia, radiancia e irradiancia. El instrumento cubre un rango espectral de 350 a 2500 nm, con un intervalo de muestreo de 1,4 nm entre 350 y 1000 nm, y de 2 nm entre 1001 y 2500 nm. La resolución espectral es de 3 nm a 700 nm y 10 nm a 1400/2100 nm.

La morfología se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un microscopio Carl Zeiss NTS-SUPRA 40.

Las curvas de tensión-corriente se obtuvieron utilizando un Autolab/PSTAT101. Como fuente de luz AM1.5G se empleó un simulador solar clase ABB (LCS-100, Oriel), fijando la intensidad equivalente a 1 sol mediante una celda de referencia calibrada de silicio.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que las celdas solares de perovskita, tanto de MAPI como de triple catión, presentan un desempeño notable bajo iluminación interior, con eficiencias de conversión de potencia significativamente superiores a las medidas bajo condiciones estándar de un sol (AM1.5G). Esta mejora se atribuye a su alta movilidad de portadores, baja densidad de defectos y adecuada

adaptación espectral a fuentes de luz artificial. Entre los dos materiales estudiados, las celdas de MAPI mostraron mayores eficiencias globales, principalmente por su elevada fotocorriente, mientras que las de triple catión, se vieron limitadas por menores factores de forma debido a mayores pérdidas resistivas y recombinación. El análisis morfológico mediante SEM reveló que el mayor tamaño de grano en MAPI favorece una menor densidad de defectos y una mejor recolección de portadores, lo que explica en parte su mejor desempeño.

El estudio comparativo bajo dos fuentes de iluminación interior (RB y MW) evidenció que el espectro de emisión y la potencia radiante influyen significativamente en la respuesta fotovoltaica. En general, las lámparas RB propiciaron un mejor rendimiento, con factores de forma más altos y un comportamiento más estable frente a la variación de la irradiancia, especialmente en las celdas MAPI. Asimismo, se observó una dependencia lineal de la corriente de cortocircuito con la potencia incidente, indicando un comportamiento predecible en el régimen de baja iluminación. Estos resultados resaltan el potencial de optimizar tanto la arquitectura de las celdas como la adecuada selección de las fuentes lumínicas disponibles en el mercado, así como la adaptación de los materiales absorbentes a sus espectros de emisión, con el fin de impulsar el desarrollo de dispositivos electrónicos autónomos y sistemas IoT alimentados mediante dispositivos fotovoltaicos de interiores.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

PROYECTOS DE DESARROLLO E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA - CyTEB: Ciencia y Tecnología en Energías Bonaerenses (2023) – PROINGED I  
*Celdas solares de perovskitas para usos en dispositivos móviles y aplicación en interiores*

PIP 2023-2025 GI (11220220100489CO)

*Estudio de la degradación de perovskitas híbridas por métodos ópticos*

## AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer la operación del SEM de la Dra. M. Claudia Marchi del CEMA – FCEyN. Se agradece al Depto. Energía Solar de la CNEA por el equipamiento necesario para la caracterización de las celdas solares y la evaporadora de metales.

## REFERENCIAS

- Cheng, R., Chung, C.-C., Zhang, H., Liu, F., Wang, W.-T., Zhou, Z., Wang, S., Djurišić, A. B., y Feng, S.-P. (2019). Tailoring triple-anion perovskite material for indoor light harvesting with restrained halide segregation and record high efficiency beyond 36 %. *Advanced Energy Materials*, 9 (38), 1901980.
- Dagar, J., Castro-Hermosa, S., Lucarelli, G., Cacialli, F., y Brown, T. M. (2018). Highly efficient perovskite solar cells for light harvesting under indoor illumination via solution processed SnO<sub>2</sub>/MgO composite electron transport layers. *Nano Energy*, 49, 290-299.
- Dong, C., Li, M., Zhang, Y., Wang, K.-L., Yuan, S., Igbari, F., Yang, Y., Gao, X., Wang, Z.-K., y Liao, L.-S. (2020). Lead oxalate-induced nucleation retardation for high-performance indoor and outdoor perovskite photovoltaics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12 (1), 836-843.
- Guo, Z., Jena, A. K. y Miyasaka, T. (2023). Halide Perovskites for Indoor Photovoltaics: The Next Possibility. *ACS Energy Letters* 8 (1), 90–95.
- He, X., Chen, J., Ren, X., Zhang, L., Liu, Y., Feng, J., Fang, J., Zhao, K., y Liu, S. (2021). 40.1 % record low-light solar-cell efficiency by holistic trap-passivation using micrometer-thick perovskite film. *Advanced Materials*, 33 (27), 2100770.
- Kang, S. B., Patil, P., Yoon, G. W., Han, G. S., Jung, H. S., y Kim, D. H. (2024). Study of interface engineering on perovskite-based indoor photovoltaics for powering Internet-of-Things. *Chemical Engineering Journal*, 502, 157973.
- Kim, S., Jahandar, M., Jeong, J. H. y Lim, D. C. (2019). Recent Progress in Solar Cell Technology for Low-Light Indoor Applications. *Current Alternative Energy* 3 (1), 3–17.

- Kumari, P., Prasanthkumar, S., y Lingamallu, G. (2024). Recent progress on perovskite based indoor photovoltaics: Challenges and commercialization. *Solar Energy*, 284, 113049.
- Le, T. S., Chuyko, I. A., Luchnikova, L. O., Ilicheva, K. A., Sukhorukova, P. K., Balakirev, D. O., Saratovsky, N. S., Alekseev, A. O., Kozlov, S. S., Muratov, D. S., Voronov, V. V., Gostishchev, P. A., Kiselev, D. A., Ilina, T. S., Vasilev, A. A., Polyakov, A. Y., Svidchenko, E. A., Maloshitskaya, O. A., Luponosov, Y. N., y Saranin, D. S. (2024). Tailoring wetting properties of organic hole-transport interlayers for slot-die-coated perovskite solar modules. *Solar RRL*, 8 (22), 2400437.
- Lee, H. K. H., Barbé, J. y Tsoi, W. C. (2020). Organic and perovskite photovoltaics for indoor applications. *Solar Cells and Light Management: Materials, Strategies and Sustainability*. 355–388. Elsevier.
- Li, Y., Grabham, N. J., Beeby, S. P. y Tudor, M. J. (2015). The effect of the type of illumination on the energy harvesting performance of solar cells, *Solar Energy*, 111, 21-29.
- Li, Y., Nie, T., Ren, X., Wu, Y., Zhang, J., Zhao, P., Yao, Y., Liu, Y., Feng, J., Zhao, K., Zhang, W., y Liu, S. (2024). In Situ Formation of 2D Perovskite Seeding for Record-Efficiency Indoor Perovskite Photovoltaic Devices. *Advanced Materials*, 36 (3), 2306870.
- Lübke, D., Hartnagel, P., Angona, J., y Kirchartz, T. (2021). Comparing and quantifying indoor performance of organic solar cells. *Advanced Energy Materials*, 11 (34), 2101474.
- Ma, Q., Wang, Y., Liu, L., Yang, P., He, W., Zhang, X., Zheng, J., Ma, M., Wan, M., Yang, Y., Zhang, C., Mahmoudi, T., Wu, S., Liu, C., Hahn, Y.-B., y Mai, Y. (2024). One-step dual-additive passivated wide-bandgap perovskites to realize 44.72%-efficient indoor photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 17 (5), 1637-1644.
- Mathews, I., Kantareddy, S. N., Buonassisi, T. y Peters, I. M. (2019). Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells. *Joule* 3 (6), 1415–1426.
- Muhammad, B. T., Kar, S., Stephen, M., y Leong, W. L. (2022). Halide perovskite-based indoor photovoltaics: recent development and challenges. *Materials Today Energy*, 23, 100907.
- Pecunia, V., Occhipinti, L. G. y Hoyer, R. L. Z. (2021). Emerging Indoor Photovoltaic Technologies for Sustainable Internet of Things. *Advanced Energy Materials* 11 (29), 2100698.
- Song, Z., McElvany, C. L., Phillips, A. B., Celik, I., Krantz, P. W., Wathage, S. C., Liyanage, G. K., Apul, D., y Heben, M. J. (2017). A techno-economic analysis of perovskite solar module manufacturing with low-cost materials and techniques. *Energy & Environmental Science*, 10 (6), 1297-1305.
- Wang, K.-L., Zhou, Y.-H., Lou, Y.-H. y Wang, Z.-K. (2021). Perovskite indoor photovoltaics: opportunity and challenges. *Chemical Science*, 12, 11936–11954.
- Wojciechowski, K. y Forgács, D. (2022). Commercial Applications of Indoor Photovoltaics Based on Flexible Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Letters*. 7 (10), 3729–3733.

## PEROVSKITE SOLAR CELLS FOR USE IN MOBILE DEVICES AND INDOOR APPLICATIONS

**ABSTRACT** This work aimed to develop and evaluate perovskite solar cells for indoor photovoltaic applications, with potential use in portable devices and IoT systems. Two active compositions, MAPI and triple cation, were studied by performing spectral characterization of two low-power LED lamps (RB and MW) and fabricating n-i-p architecture cells through a one-step method. Film morphology was analyzed using scanning electron microscopy, and photovoltaic performance was assessed through J–V curves under standard AM1.5G illumination and low irradiance conditions (200–1000 lux). The results showed that both perovskites achieved power conversion efficiencies higher than those measured under 1 sun, attributable to their good spectral match with artificial light sources and low non-radiative recombination. The MAPI composition exhibited higher overall efficiencies due to its greater photocurrent and larger grain size, whereas the triple cation composition was limited by lower fill factors. RB lamps yielded better performance than MW lamps, highlighting the importance of emission spectrum. In conclusion, these cells demonstrate high potential for powering autonomous devices and optimizing energy harvesting in low-light environments.

**Keywords:** perovskite solar cells, indoor illumination, IoT