

Marc Mas Mallafré

**Automatización de equipo de testeo y estudio de
estabilidad operacional de celdas fotovoltaicas**

**Trabajo de Fin de Máster
dirigida por el Dr. Osbel Almora Rodríguez**

Máster Universitario en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
Septiembre 2024**

Dedico este trabajo a toda persona
que en esta vida me haya dado
ánimos para seguir adelante.

En particular a toda mi familia
y a los profesores que a lo largo de los años
me han enseñado a ser quien soy.

Índice de Contenidos

1.	Introducción.....	1
1.1.	Problema energético.....	1
1.2.	Energías renovables	1
1.3.	Tecnologías fotovoltaicas	2
1.4.	Materiales y estabilidad de las celdas solares emergentes de película delgada	4
1.5.	Funcionamiento de una celda fotovoltaica	5
1.5.1.	Uniones de semiconductores.....	5
1.5.2.	Circuito equivalente	8
1.5.3.	Curva corriente-voltaje.....	10
1.5.4.	Eficiencia de conversión de potencia.....	11
1.6.	Objetivos y perspectiva.....	14
1.7.	Antecedentes.....	15
2.	Metodología	16
2.1.	Muestras y estructuras de soporte	16
2.1.1.	Muestras de celdas solares orgánicas	16
2.1.2.	Muestras de celdas solares de perovskita.....	17
2.1.3.	Estructuras de soporte (holders)	17
2.2.	Estación de testeo de degradación.....	18
2.2.1.	Procedimiento en la toma de medidas	19
2.2.2.	Experimentos de temperatura del color.....	23
2.3.	Software LabVIEW	28
3.	Resultados y discusión	34
3.1.	Implementación Arduino.....	34
3.1.1.	Kit Arduino UNO	34
3.1.2.	Sensor DHT22 (AM2302).....	35
3.1.3.	Monitor (Display) de 4 dígitos de 7 segmentos	36
3.1.4.	Protección (Shield) de conexión de bornas	37
3.1.5.	Estructura modular de protección.....	38
3.1.6.	Código de programación en el kit Arduino UNO	39
3.1.7.	Interfaz entre el kit Arduino UNO y el software LabVIEW	44
3.2.	Mediciones experimentales.....	45
3.2.1.	OSC1: testeo de estabilidad	45
3.2.2.	OSC2: testeo de estabilidad	49
3.2.3.	OSC3: diferentes iluminancias.....	52

3.2.4.PSC4: testeo de estabilidad	54
3.2.5.PSC5: testeo de estabilidad	57
3.2.6.PSC6: testeo de estabilidad	60
3.2.7.PSC7: diferentes iluminancias	63
3.2.8.Discusión sobre las celdas solares medidas	65
4. Conclusiones	67
5. Anexo	68
6. Referencias	71

Índice de Figuras

Figura 1. a) Estructura, distribución b) de portadores y c) de carga, d) campo eléctrico y e) diagrama de banda de una unión p-n en equilibrio sin aplicar voltaje externo (Titus et al., 2011).	7
Figura 2. a) Estructura, distribución b) de portadores y c) de carga, d) campo eléctrico y e) diagrama de banda de una unión p-i-n en equilibrio sin aplicar voltaje externo (Titus et al., 2011).	7
Figura 3. Esquema de estructura de capas p-i-n en PSCs (Almora Rodríguez, 2020).....	8
Figura 4. Circuito equivalente de (a) una celda fotovoltaica ideal y (b) una celda fotovoltaica real (Jäger et al., 2014).	8
Figura 5. Caracterización J-V de una celda fotovoltaica ante oscuridad e iluminación (Jäger et al., 2014).	10
Figura 6. Diagrama de flujo para analizar la curva J-V en PSCs y OSCs (These et al., 2024).	14
Figura 7. a) Estructura de capas, b) disposición de píxeles y c) fotografía de una muestra de OSC con un pixel (plateado) degradado en MPP y el resto en circuito abierto durante un test de estabilidad. Fotografía cedida por la Dra. Magaly Estrada.	16
Figura 8. a) Estructura de capas, b) disposición de píxeles o diodos y c) fotografía de muestras de PSC en diferentes estados de degradación (Almora et al., 2017).....	17
Figura 9. Estructuras de soporte para las muestras de a) OSC y b) PSC.	18
Figura 10. Estructura de conexionado de los equipos en la estación de testeo de degradación.	22
Figura 11. Esquema eléctrico para la adquisición en las celdas solares de variables eléctricas en configuración a) MPP y en b) OC, elaborado con la herramienta virtual smartdraw.com.	22
Figura 12. Representación visual de la temperatura del color (Lighting Style, s. f.).	23
Figura 13. Espectros para las distintas lámparas.	24
Figura 14. Espectros e integrales de potencia de entrada a 200 lux y 1000 lux para las distintas lámparas de a) 1500 K 160 lm, b) 2200 K 235 lm, c) 2700 K 250 lm, d) 2700 K 1320 lm, e) 2700 K 1521 lm, f) 3000 K 806 lm, g) 3000 K 950 lm, h) 4000 K 806 lm, i) 4000 K 1521 lm, j) 4100 K 800 lm k) 6500 K 806 lm y l) 5780 K AM1.5G.	26
Figura 15. Integrales de potencia de entrada a 200 lux y 1000 lux para las temperaturas de las distintas lámparas.	27
Figura 16. Curvas J-V para las distintas lámparas a 200 lux, 1000 lux y 2000 lux.	27
Figura 17. Diagrama de flujo en la programación J-V en LabVIEW.	31
Figura 18. Diagrama de bloques de la lógica de la programación J-V en LabVIEW.....	32
Figura 19. Panel frontal de la programación J-V en LabVIEW.	33
Figura 20. Diagrama de pines del kit Arduino UNO (Arduino, 2024b).	34
Figura 21. Sensor DHT22 (AM2302) (RS, s. f.).....	36
Figura 22. Display de 4 dígitos de 7 segmentos 3642BH.	36
Figura 23. Etiquetaje y funcionamiento de encendido de los segmentos del display.	37
Figura 24. Shield de conexiones de bornas (a) cara superior y (b) cara inferior.	38

Figura 25. Diagrama eléctrico entre los dispositivos externos y el kit Arduino UNO, elaborado con la herramienta virtual circuit-diagram.org.....	38
Figura 26. Diseño dimensional de la estructura modular para el soporte y protección del kit Arduino UNO y la shield de conexiones, elaborado con la herramienta virtual tinkercad.com.	39
Figura 27. Estructura modular con el montaje de la shield, el kit Arduino UNO, el sensor DHT22 y el display de 4 dígitos de 7 segmentos.	39
Figura 28. Código de programación del microcontrolador del kit Arduino UNO.	43
Figura 29. Diagrama de bloques de la comunicación entre el kit Arduino UNO y el software de LabVIEW.	44
Figura 30. Comparativa de la curva J-V de los distintos píxeles de la muestra OSC1 a) a 100% de eficiencia (SSIM), b) a 95% de eficiencia, c) a 80% de eficiencia y d) a 50% de eficiencia y a distintos tiempos de degradación en el e) píxel 1, f) píxel 2, g) píxel 3 y h) píxel 4.	47
Figura 31. Evolución durante la degradación en el píxel 1 de la muestra OSC1 bajo iluminancia de 1000 lux de a) curva R-V, b) curva m-V, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) V_{mpp} y V_{oc} , e) FF y f) PCE y P_{mpp}	49
Figura 32. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra OSC2 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 3 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.	50
Figura 33. Evolución durante la degradación en el píxel 3 de la muestra OSC2 bajo iluminancia de 1000 lux de a) I_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y $V_{oc}(p4)$ y f) PCE y P_{mpp}	52
Figura 34. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra OSC3 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 2 a iluminancias de 200, 500, 1000, 2000 y 5000 lux.....	53
Figura 35. Comparación en el píxel 2 de la muestra OSC3 bajo distintas iluminancias de a) J_{mpp} y J_{sc} , b) V_{mpp} y V_{oc} , c) FF y f) PCE.	54
Figura 36. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC4 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 4 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.	55
Figura 37. Evolución durante la degradación en el píxel 4 de la muestra PSC4 bajo iluminancia de 1000 lux de a) I_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y $V_{oc}(p4)$ y f) PCE y P_{mpp}	57
Figura 38. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC5 con el simulador solar al inicio y fin de la degradación y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 1 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.	58
Figura 39. Evolución durante la degradación en el píxel 1 de la muestra PSC5 bajo iluminancia de 1000 lux de a) I_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y $V_{oc}(p2)$ y f) PCE y P_{mpp}	60
Figura 40. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC6 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 4 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.	61
Figura 41. Evolución durante la degradación en el píxel 4 de la muestra PSC7 bajo iluminancia de 1000 lux de a) I_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y $V_{oc}(p3)$ y f) PCE y P_{mpp}	63
Figura 42. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC7 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en los distintos píxeles a iluminancias de 200, 500, 1000, 2000 y 5000 lux.	64

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de enfoques para clasificar tecnologías y conceptos fotovoltaicos en función de su antigüedad, disponibilidad tecnológica y potencial de costo y eficiencia (Almora et al., 2023).	3
Tabla 2. Resumen de algunos de los mecanismos de degradación que se producen en las celdas solares de perovskita (Julien et al., 2022).....	4
Tabla 3. Características de temperatura de color (K) y flujo luminoso (lm) para las distintas lámparas.	23
Tabla 4. Entradas, cálculos y salidas utilizadas en la lógica de programación.	28
Tabla 5. Detalle de las mediciones experimentales tomadas en las distintas muestras.....	45
Tabla 6. Resumen de resultados en las mediciones de las distintas muestras.	66
Tabla 7. Resumen de ratio de degradación en las mediciones de las distintas muestras.	66

Siglas y Abreviaturas

A continuación, se presentan en orden alfabético las siglas y abreviaturas utilizadas a lo largo de este proyecto:

A	Amperios
ADC	Convertidor Analógico-Digital
AgBiS	Material formado por plata, bismuto y azufre
AL	Capa activa
A-Si	Silicio amorfo
Au	Oro
CdS	Sulfuro de cadmio
CdTe	Telururo de cadmio
CIGS	Celdas solares de cobre, indio, galio y selenio
CO ₂	Dióxido de carbono
CsPbI ₃	Material formado por cesio, plomo y yodo
CZTS	Material formado por cobre, zinc, estaño y azufre
DR	Tasa de degradación
DSSC	Celdas solares sensibilizadas por colorante
DwC	Convertidor de longitud de onda aguas abajo
ESL	Capa selectiva de electrones
ESM	Material selectivo de electrones
ETL	Capa de transporte de electrones
ETM	Material transportador de electrones
FF	Factor de llenado
GaAs	Arseniuro de galio
GDP	Producto interior bruto
GND	Conector común de tierra
HSL	Capa selectiva de huecos
HSM	Material selectivo de huecos
HTL	Capa de transporte de huecos
HTM	Material transportador de huecos
Isc	Corriente de cortocircuito
ITO	Óxido de indio y estaño
J	Densidad de corriente a bornas de la celda solar
J _{gen,th}	Densidad de corriente de generación térmica
J _{mpp}	Densidad de corriente en el punto de máxima potencia
J _{ph}	Densidad de corriente fotogenerada
J _{rec}	Densidad de corriente de recombinación
J _s	Densidad de corriente de saturación en el diodo
J _{sc}	Densidad de corriente de cortocircuito
K	Kelvin
k _B	Constante de Boltzmann
Kcd	Factor de conversión de 683 lm/W
Lin	Luminiscencia incidente
m	Factor de idealidad del diodo
Mc-Si	Silicio monocristalino
MEG	Generación de excitones múltiples

MPP	Punto de máxima potencia
MW	Megavatios
OC	Circuito abierto
OSCs	Celdas solares orgánicas
PbI ₂	Diyoduro de plomo
PCBM	[6,6]fenil-C ₆₁ -ácido butírico metil éster
PCE	Eficiencia de Conversión de Potencia
PeC	Celda solar plasmónica
PEDOT:PSS	Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato)
Pmax	Potencia máxima
Pmpp	Potencia en el punto de máxima potencia
Poly-Si	Silicio policristalino
PSCs	Celdas solares de perovskita
Pt	Platino
PV	Fotovoltaico
QDSC	Celdas solares de puntos cuánticos
Rs	Resistencia serie
RSC	Conversión solar rectenna
Rsh	Resistencia de derivación o paralela
s	Irradiancia espectral normalizada
SbS	Celdas solares con sulfuro de antimonio
Semiconductor p	Semiconductor extrínseco tipo p
Semiconductor n	Semiconductor extrínseco tipo n
Semiconductor i	Semiconductor intrínseco
SF	Fisión singlete
Si	Silicio
SMU	Unidad de medida y fuente
Spiro-OMeTAD	Derivado de espirobifluoreno fuertemente sustituido
SSIM	Simulador solar
T	Temperatura
TCO	Óxido conductivo transparente
TFSC	Celdas solares de película delgada
TiO ₂	Dióxido de titanio
TL	Capas transportadoras
UJI	Universidad Jaume I de Castellón
UpC	Convertidor de longitud de onda aguas arriba
URV	Universidad Rovira i Virgili de Tarragona
V	Voltaje externo aplicado
Voc	Voltaje de circuito abierto
I_{in}	Irradiancia espectral incidente

1. Introducción

1.1. Problema energético

La producción de energía es imprescindible para mantener y mejorar los estándares de vida de la actualidad. Solo en el sector residencial, la cocina, calefacción y transporte son algunos de los campos en que ésta se hace más necesaria. En la industria y los servicios, la demanda energética no solo es mayor, sino que define las características socioeconómicas de la región o grupo de que se trate. Por ejemplo, diferencias fundamentales pueden encontrarse entre países con distintos niveles de desarrollo y densidades poblacionales. Pero en la mayoría de los casos, la demanda energética sigue en ascenso y la mayoría de las fuentes de generación continúan siendo basadas en energías no renovables, como los combustibles fósiles. El aumento de consumo energético se puede deber al alza en los estándares de vida o en cantidad de población. Esto se suma a la continuación del esquema energético tradicional, debido a la inviabilidad práctica o económica de la mayoría de las tecnologías alternativas. Las llamadas tecnologías renovables, sostenibles y amigables con el medio ambiente con que se cuentan en este momento no son aun suficientemente rentables o accesibles, como para desplazar los esquemas productivos establecidos.

Los combustibles fósiles, sustancias combustibles que están en la corteza terrestre y que se forman por la descomposición de la materia orgánica, han sido las principales fuentes de energía a lo largo de la historia. Son ejemplos de estos combustibles fósiles el carbón, el petróleo y el gas natural. Estas son de las fuentes de energía más contaminantes y de mayores emisiones de carbono. Estos factores propician el cambio climático y el aumento de la temperatura media del planeta. Uno de los desafíos para solucionar estos problemas consiste en reducir la pobreza energética al mismo tiempo que se reducen las emisiones de carbono, es decir, conseguir enlazar la producción de energía con el concepto de sostenibilidad. Para prevenir el aumento de temperatura se debería llegar hasta el valor objetivo de cero emisiones de dióxido de carbono por actividad humana, y así garantizar la habitabilidad del planeta para las generaciones futuras. Para lograr este desafío, es necesario desarrollar alternativas a los combustibles fósiles que sean aplicables a gran escala, baratas, sostenibles y seguras. El desarrollo de las energías renovables podría ser una solución viable a estos problemas. (Roser, 2024)

1.2. Energías renovables

Las energías renovables son aquellas derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse. Típicamente, estas aprovechan recursos naturales para la generación de energía sin la necesidad de combustibles fósiles. Aunque la gran mayoría de ellas representen una reducción en las emisiones de carbono a la atmósfera, esta afirmación no es aplicable a todas ellas. Por ejemplo, la biomasa y los biocombustibles implican niveles significativos de contaminación y pueden suponer conflictos con la industria alimentaria. Por otro lado, también encontramos las energías solar, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, undimotriz, y geotérmica. Aunque la energía hidroeléctrica y la biomasa son las fuentes de energía renovable más antiguas, la energía solar y eólica destacan por ser las fuentes modernas, con más auge en la última década.

Las fuentes de energía tienen una historia marcada por los combustibles fósiles pero cada vez más las energías renovables representan mayor parte del mix energético. Este está formado por tres grandes grupos: electricidad, transporte y calefacción. Un séptimo del mix energético proviene actualmente de energías renovables y una tercera parte del mix eléctrico es producido con estas fuentes. (Ritchie et al., 2024)

Dentro de las energías renovables se encuentra la energía solar fotovoltaica (PV), la cual transforma la radiación solar en energía eléctrica, y la energía solar térmica, que

aprovecha la radiación solar para generar energía térmica. Una celda solar es el dispositivo encargado de realizar la transformación de radiación solar a electricidad mediante el efecto fotovoltaico, y estas se conectan formando módulos o placas fotovoltaicas para generar mayor cantidad de energía eléctrica. Estructuralmente, las celdas solares están formadas por dos electrodos metálicos (ánodo, o terminal positivo, y cátodo, o terminal negativo) separados por materiales semiconductores en una o varias uniones tipo p-n, o p-i-n/n-i-p. (Sarah et al., 2020)

1.3. Tecnologías fotovoltaicas

Las tecnologías utilizadas para la construcción de celdas solares han ido evolucionando desde la fabricación de la primera demostración de celda en 1954, en los laboratorios Bell. En general, hay consenso respecto al papel fundador, comercialmente establecido y consolidado de la tecnología de celdas solares de silicio. Esta constituye la primera "generación" u "ola" de tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, las subsiguientes tecnologías pueden ser agrupadas o clasificadas de acuerdo a diferentes parámetros, como el desarrollo temporal, el diseño, o definiciones más técnicas o específicas. Esto se resume en la Tabla 1, donde se comparan tres clasificaciones fundamentales.

En términos de "olas" fotovoltaicas (también llamadas generaciones por algunos autores), se analiza principalmente la evolución temporal y los métodos de fabricación de los dispositivos (ver primera fila de la Tabla 1). Esto sitúa las celdas de película delgada fabricadas por métodos de vacío (e.g., CdTe y CuInGaSe) en la "2^{da} ola" mientras que la "3^{ra} ola" incluye tecnologías más recientes y basadas en métodos de fabricación de bajo costo (e.g., perovskitas, orgánicas y de tinturas sensibilizadas). La cuarta o siguiente ola incluye conceptos que aún están en fases tempranas de desarrollo.

De acuerdo con la disponibilidad comercial y la atención académica a investigación, las fotovoltaicas se pueden dividir entre establecida (o consolidada) y emergente (ver segunda fila de la Tabla 1). Las tecnologías consolidadas incluyen el silicio y las celdas de película delgada, que han alcanzado instalaciones en el orden de los MW. Por otro lado, la fotovoltaica emergente, que incluye el resto del campo de desarrollo, se divide a su vez en "tecnologías y dispositivos" y "materiales y conceptos". Algunas de las tecnologías y dispositivos emergentes, como las celdas de perovskitas y las de tinta sensibilizadas, ya han iniciado el "salto" de la investigación académica a líneas piloto de producción industrial. Por otro lado, entre los materiales y conceptos emergentes aún se encuentran dificultades para el desarrollo experimental de las predicciones teóricas, y no hay consenso obvio sobre los métodos de validación de resultados.

La más antigua, pero también discutiblemente polémica, categorización se corresponde a las generaciones fotovoltaicas de M. Green, que a principios de la década de los 2000 separó las celdas de película delgadas en la segunda generación y agrupó los conceptos de multijuntura, concentración y bajos-costos en una 3ra generación. Esto luego generaría conflictos de conceptualización cuando celdas de juntura simple de película delgada de perovskita y polímeros fueran también clasificadas de bajo costo, aunque no pudieran sobrepasar el límite de eficiencia de balance detallado.

Tabla 1. Resumen de enfoques para clasificar tecnologías y conceptos fotovoltaicos en función de su antigüedad, disponibilidad tecnológica y potencial de costo y eficiencia (Almora et al., 2023).

Olas de investigación PV	1ª ola Dispositivos con cuerpo de unión homounión Si	2ª ola Dispositivos de película delgada heterounión fabricados con procesos al vacío a-Si, CdTe, CIGS	3ª ola Dispositivos y materiales con fabricación de bajo costo/basada en soluciones y/o límites de PCE más allá del modelo DB de unión única con/sin multiunión o concentración OSCs, DSSC, PSCs, CZTS, SbS, AgBiS, celdas solares de puntos cuánticos, celdas multiunión, celdas solares concentradas	4ª o siguiente ola Nuevos dispositivos, materiales y/o conceptos con (i) potencial para superar el límite PCE de las uniones únicas DB, y (ii) bajo nivel de preparación tecnológica Down- and Up-Conversion (DwC, UpC), Singlet fission (SF), Multiple exciton generation (MEG), Plasmonic-enhanced cells (PeC), Rectenna solar conversion (RSC)
Reportes PV emergentes (ePVR)	Consolidado Mayormente disponible comercialmente con instalaciones MW Si, a-Si, CdTe, CIGS		Emergente Exclusiva o mayormente en fases de investigación con ninguna disponibilidad comercial o limitada y aplicaciones versátiles incluyendo, pero no limitado a, la alimentación de redes de gran escala Tecnología y dispositivos: PSCs, OSCs, DSSC, CZTS, SbS, AgBiS, celdas multiunión, celdas concentradas Materiales y conceptos: QD, DwC, UpCm, SF, MEG, PeC, RSC	
Generaciones de tecnología PV	1ª Generación Si	2ª Generación Celdas solares de película delgada: a-Si, CdTe, CIGS PSCs, OSCs, DSSCs, CZTS, SbS, AgBiS	3ª Generación Fabricación de bajo coste y/o límite de PCE más allá del modelo DB de unión única: Celdas multiunión, celdas concentradas	

Independientemente de su clasificación, a continuación se enumeran algunas de las tecnologías más destacadas, que también aparecen en la tabla anterior (Sarah et al., 2020):

- Las celdas monocristalinas (Mc-Si, por su acrónimo en inglés) están formadas por un único cristal de silicio sin impurezas y su eficiencia de conversión de potencia (PCE por sus siglas en inglés) ha sido demostrada hasta el 26.1%. Destacan su alto coste de fabricación, bajo coste de instalación, alta durabilidad y fragilidad.
- Las celdas policristalinas (Poly-Si, por su acrónimo en inglés) están formadas por más de un cristal de silicio con estructuras cristalinas de tamaños distintos y su PCE ya ha alcanzado el 23.3%. Destaca su menor eficiencia, pero usa un proceso de producción más simple y es más tolerante con las altas temperaturas.
- Las celdas de silicio amorfo (A-Si, por su acrónimo en inglés) están formadas por una superposición de capas finas de silicio y su PCE ha llegado al 14.0%. Destaca por su fácil fabricación, menor toxicidad y mayor flexibilidad.
- Las celdas de arseniuro de galio (GaAs) presentan eficiencias muy superiores, llegando a pasar la eficiencia del 30%, pero sus costes son muy elevados, hecho que limita su uso a aplicaciones aeroespaciales.
- Las celdas de telururo de cadmio (CdTe) están formadas por una capa de CdS y una capa de CdTe, creando la unión P-N a capas delgadas. Además, añaden una capa ITO como antirreflejante, también utilizada en otras tecnologías. Su PCE récord es de 23.1% y destaca por su menor coste de fabricación, aunque el cadmio resulta tóxico.
- Las celdas de cobre/indio/galio/di-selenio (CIGS) están formadas por un semiconductor mezcla de los elementos que forman su nombre y su mejor PCE en laboratorios ha sido certificada con un valor de 23.6 %. Destaca por su menor toxicidad respecto al CdTe.
- Las celdas orgánicas (OSCs, por sus siglas en inglés) están formadas por una base de polímeros a partir de los cuales se elaboran la capa activa y las de transporte. Destaca por su menor peso, mayor flexibilidad, la facilidad en su transporte y almacenaje y su sostenibilidad, con valores de PCE demostrados por encima del 19%. Sin embargo, su rápida degradación continúa siendo el principal obstáculo para desarrollo a escala industrial.

- Las celdas sensibilizadas por colorante (DSSC, por sus siglas en inglés) están formadas por capas semiconductoras de transporte, típicamente de TiO_2 y Pt, un colorante que constituye el material absorbedor y un electrolito. Su PCE récord experimental es de 13.0%, y destaca por su bajo coste de producción, y su flexibilidad, pero el contenido de disolventes volátiles del electrolito limita su aplicabilidad a gran escala.
- Las celdas de perovskita de haluros (PSCs, por sus siglas en inglés) están formadas por capas absorbedoras de la familia de compuestos metal halogenados con estructura cristalina de perovskita y tiene una eficiencia récord experimental del 26.7%. Destaca por su bajo coste de producción, compatibilidad con sustratos flexibles y variabilidad de absorción para aplicaciones de interior y transparentes. Por otro lado, su principal limitante es la baja estabilidad intrínseca y debido a la humedad. Además, el contenido tóxico de plomo de estas celdas tampoco es deseado. Estos elementos requieren desarrollo de sistemas de encapsulamiento y reciclaje que aumentan los costos de instalación y mantenimiento. (Eficiencias extraídas de (ONREL, 2024))

1.4. Materiales y estabilidad de las celdas solares emergentes de película delgada

Las celdas orgánicas y de perovskitas han demostrado un progreso significativo durante la última década. Sin embargo, su falta de estabilidad y rápida degradación continúan siendo el limitante principal para su desarrollo industrial. Ambas tecnologías incluyen métodos de fabricación en base a disoluciones con relativamente bajas temperaturas de procesamiento. Esto, y el componente orgánico de sus materiales, resulta en una relativa "suavidad" de los materiales en términos de estabilidad composicional. Por ejemplo, en la *Tabla 2* se resume los principales motivos asociados con el deterioro de las PSCs. El análisis incluye (en diferentes filas de la *Tabla 2*) los efectos relacionados con las tres principales capas del dispositivo: la absorbidora (perovskita), y las capas de materiales para el transporte de electrones y huecos. Estas capas también se conocen como materiales o capas selectivas o transportadoras de electrones y huecos, con varias abreviaciones: ETL y HTL, ETM y HTM, ESL y HSL, ESM y HSM, por sus siglas en inglés, respectivamente. También se ilustra (en columnas de la *Tabla 2*), los tipos de mecanismos de degradación, parámetros de condiciones de degradación, de propiedades de materiales y de rendimiento. Entre estos últimos, se resaltan los valores de factor de llenado (FF), voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), que componen el cálculo de la PCE.

Tabla 2. Resumen de algunos de los mecanismos de degradación que se producen en las celdas solares de perovskita (Julien et al., 2022).

Tipo de mecanismo de degradación	Factores ambientales	Comentarios	Parámetros de los materiales	Parámetros eléctricos de las celdas
MATERIAL DE PEROVSKITA				
Descomposición del material/Modificación de la estructura cristalina o la composición	Humedad relativa, temperatura, oxígeno, luz	La degradación del cuerpo puede comenzar en los límites de los granos y verse potenciada por la formación de hidratos y las migraciones de iones. La descomposición puede ser causada por una reacción química como reacciones ácido-base o fotooxidación, y formar agua, PbI_2 y/o componentes gaseosos. Las modificaciones de la estructura cristalina pueden ser causadas por hidratos o temperatura. Los perovskitas de composición mixta son más propensos a la segregación de fases.	Densidad de defectos, movilidad de los portadores, brecha energética, afinidad de los electrones.	V_{oc} y FF decrecen al principio, después lo hace J_{sc} . La pérdida en la movilidad de los electrones puede inducir un incremento de V_{oc} .
Reacción con los electrodos metálicos	Luz, oxígeno, temperatura, polarización eléctrica	Implican reacciones de haluro con metales, iones de haluro potencialmente migrados. El perovskita se degrada principalmente en la interfaz.	Densidades de defectos en el cuerpo de perovskita y en la interfaz.	Generalmente V_{oc} decrece y J_{sc} se mantiene estable, puede inducir un decremento del FF.

MATERIAL DE TRANSPORTE DE HUECOS				
Inestabilidad térmica	Temperatura	Transición de fases a baja temperatura (Spiro-OMeTAD dopado).	Movilidad de los huecos.	Jsc y FF decrecen, Voc se mantiene estable.
Oxidación	Temperatura, oxígeno, polarización eléctrica, luz	Posiblemente involucre iones de perovskita migrados y degradación en las interfaces.	Nivel de dopaje, movilidad de los huecos, interfaz de densidad de defectos.	Jsc se mantiene estable, generalmente Voc decrece y seguidamente lo hace FF.
MATERIAL DE TRANSPORTE DE ELECTRONES				
Efecto fotocatalítico	Luz, oxígeno	Extrae electrones del yoduro y los ioniza a yodo, oxida materiales orgánicos. Induce la degradación de la interfaz de perovskita.	Interfaz de densidad de defectos.	Voc y FF decrecen al principio, después lo hace Jsc.

Una característica típica de la degradación de celdas solares es el aumento de la densidad de defectos. Entendemos por densidad de defectos el número de imperfecciones o rupturas de la simetría cristalina, llamados defectos, por unidad de área en una oblea semiconductor y es una métrica importante para evaluar la calidad del proceso de fabricación.

Existen varias técnicas utilizadas para la investigación de la degradación de las PSCs. Estas técnicas permiten el caracterizado preciso de los materiales que forman la celda antes y después de su degradación, permitiendo observar la relación entre la evolución de los materiales y la degradación en la PCE. No obstante, no hay consenso sobre los mecanismos de la degradación y las rutas para evitarlo.

Otro modo de investigar la degradación consiste en el seguimiento periódico de las variables eléctricas de densidad de corriente y voltaje durante la degradación de las celdas solares, prestando especial atención a parámetros de la curva de densidad de corriente en función del voltaje (J-V): Jsc, Voc, FF y PCE. Aun así, estas variables solo permiten determinar el tiempo de vida de las celdas o el tiempo que tardan en alcanzar cierto valor límite en su eficiencia. La temperatura también resulta un factor clave a considerar para analizar la degradación de las celdas solares.

La degradación se percibe a nivel microscópico como una mayor densidad de defectos y un empeoramiento en la movilidad de los portadores de carga. También suele presentarse una disminución en la generación de pares electrón-hueco, y un aumento en la recombinación de estos. Esta degradación a nivel microscópico queda patente con la degradación perceptible a nivel macroscópico con las variables J-V. (Julien et al., 2022)

1.5. Funcionamiento de una celda fotovoltaica

1.5.1. Uniones de semiconductores

Las celdas fotovoltaicas se componen de uniones de semiconductores de materiales diferentes o con diferentes dopajes (e.g. p-n); o de alguna variante (e.g., p-i-n o n-i-p).

Cuando se trata de una unión con los mismos materiales semiconductores (aunque diferentes dopajes) esta se denomina homounión u homojuntura, y cuando se trata de una unión o juntura con distintos materiales semiconductores esta se denomina heterounión o heterojuntura.

Los semiconductores son materiales con coeficientes de resistividad intermedios entre los materiales conductores y los aislantes, que no conducen en condiciones normales, pero que cuando se da una condición óptima, como la incidencia de fotones en el caso de las celdas solares, estos pasan a conducir.

Se puede diferenciar entre los semiconductores intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos están formados por un único tipo de átomo con enlaces covalentes entre ellos, mientras que los extrínsecos están formados por materiales dopados con átomos con presencia de electrones libres y huecos, ambos portadores de carga libre.

Dependiendo de cuál de ellos es mayoritario o minoritario se habla de semiconductores tipo p o tipo n. Los semiconductores tipo p tienen como portadores mayoritarios los huecos, de carga positiva, y como portadores minoritarios los electrones, de carga negativa. En el caso de los semiconductores tipo n, los portadores mayoritarios son los electrones y los minoritarios son los huecos.

La unión de ambos tipos de semiconductores, unión p-n, permite un intercambio de portadores hasta encontrar el equilibrio. Cuando las regiones cercanas a la línea de unión quedan agotadas de portadores, se forma un potencial de barrera (campo eléctrico) en sentido contrario al flujo de electrones y huecos que impide seguir con el intercambio de portadores entre los semiconductores.

En la *Figura 1* se ilustran perfiles típicos de estructura, distribución de portadores y de carga, campo eléctrico y diagrama de banda en homouniones de tipo p-n. En ella se puede apreciar como en las zonas de empobrecimiento se han perdido los portadores mayoritarios y por ello se han quedado cargadas con la otra polaridad, carga negativa en el semiconductor tipo p y carga positiva en el semiconductor tipo n. Esta diferencia de cargas crea el campo eléctrico con pendiente negativa mientras predomina carga negativa y con pendiente positiva mientras predomina la carga positiva. También se observa la generación de un potencial de barrera que deberá superarse si se desea seguir con la conductividad entre los dos semiconductores.

Al aplicar un potencial externo en polarización directa entre las bornas de la unión p-n superior al potencial de barrera, se posibilita otra vez la transmisión de portadores y, con ello, la conductividad a través de la unión (Thériault, 2015).

Si se ilumina la unión p-n, se generan pares electrón-hueco adicionales en los materiales, incrementando los portadores minoritarios en cada semiconductor y aumentando su flujo entre las dos partes de la unión, con una densidad de corriente adicional denominada como fotogenerada. Esta densidad de corriente fotogenerada (J_{ph}) se añade a la densidad de corriente de generación térmica ($J_{gen,th}$) y a la densidad de corriente de recombinación (J_{rec}), que ya están presentes en oscuridad pero son modificadas en condiciones de iluminación. Así la ecuación de densidad de corriente en la unión p-n queda definida de la siguiente manera:

$$J = J_{rec} - J_{gen,th} - J_{ph} \quad \text{Ecuación 1}$$

Particularmente, la llamada densidad de corriente de recombinación tiene una dependencia exponencial con el voltaje externo aplicado (V) a la celda y su temperatura (T), de manera tal que la corriente a través del dispositivo se puede expresar según

$$J = J_s \left(\exp \left[\frac{qV}{mk_B T} \right] - 1 \right) - J_{ph} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde J_s es la densidad de corriente de saturación del diodo, q es la carga unitaria del electrón, k_B es la constante de Boltzmann y m es el factor de idealidad del diodo.

Las uniones de semiconductores tipo p-n son propias de las celdas solares comunes (e.g. de silicio), mientras que las celdas solares emergentes de película delgada cuentan con uniones de semiconductores tipo p-i-n o n-i-p. Estas uniones intercalan un semiconductor intrínseco entre los semiconductores dopados con electrones libres y huecos. En la *Figura 2* se puede apreciar como el hecho de interponer una capa de semiconductor intrínseco hace que las zonas de empobrecimiento, donde se acumulan los portadores libres, se reduzcan únicamente al límite entre los semiconductores p y n con el semiconductor i. Esto crea un campo eléctrico a lo largo de todo el semiconductor intrínseco que reduce el potencial de barrera, con lo que será más fácil volver la conductividad a través de la unión.

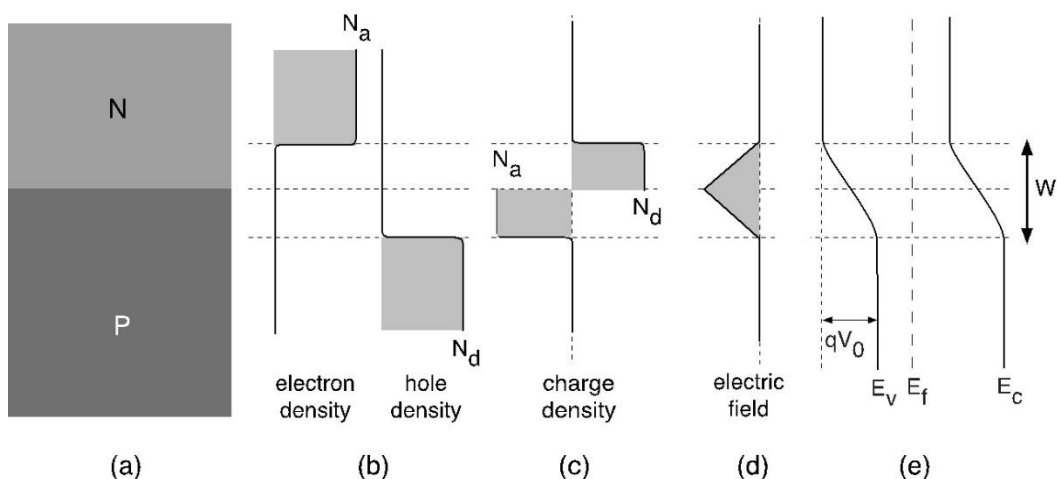


Figura 1. a) Estructura, distribución b) de portadores y c) de carga, d) campo eléctrico y e) diagrama de banda de una unión p-n en equilibrio sin aplicar voltaje externo (Titus et al., 2011).

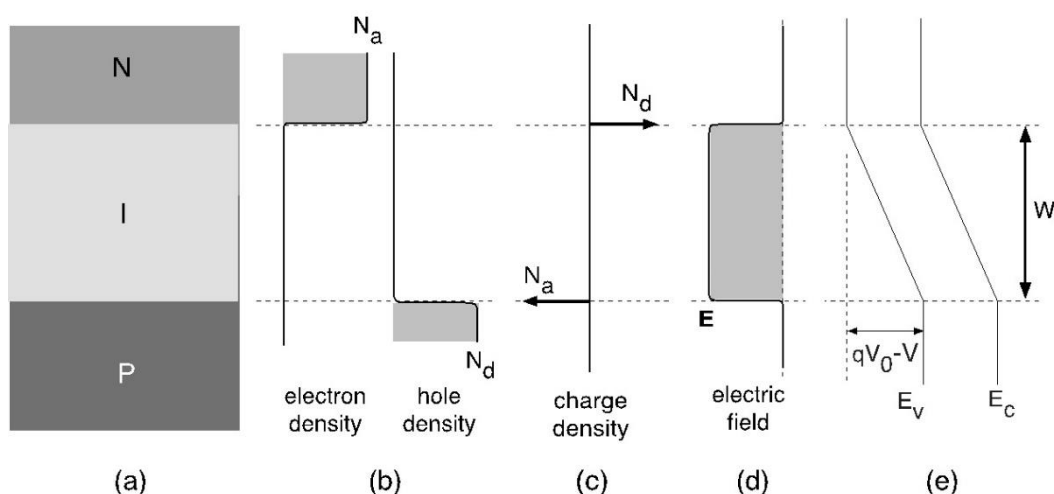


Figura 2. a) Estructura, distribución b) de portadores y c) de carga, d) campo eléctrico y e) diagrama de banda de una unión p-i-n en equilibrio sin aplicar voltaje externo (Titus et al., 2011).

Una celda solar se compone de distintas capas superpuestas unas a continuación de otras. En ella podemos encontrar la capa activa (AL, por sus siglas en inglés), las capas transportadoras (TL, por sus siglas en inglés) y los electrodos en cada extremo de la celda solar. Como capas transportadoras, podemos diferenciar entre capas transportadoras de huecos y capas transportadoras de electrones, con conductividades o dopajes típicos tipos p y n, respectivamente. Estas se ubican a cada lado de la capa activa, que comúnmente se considera intrínseca por carecer de conductividad o dopajes efectivos, y forman lo que se conoce como estructura tipo diodo p-i-n (o n-i-p). Se incluye una capa adicional de óxido conductivo transparente (TCO) cuya función es dejar pasar la luz y actuar como colector de la energía convertida. Según el orden de las capas, los materiales de estas pueden variar para mejorar su eficiencia. En la *Figura 3* se presenta un esquema típico de estructura de PSCs, donde la radiación incidente penetra el dispositivo en la dirección del HTM al ETM, conocida como p-i-n.

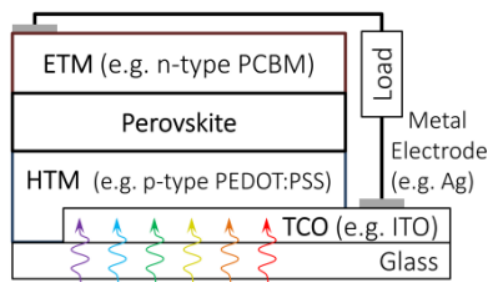


Figura 3. Esquema de estructura de capas p-i-n en PSCs (Almora Rodríguez, 2020).

En la AL se generan los portadores de carga y estos son recombinados dentro de la misma capa o son extraídos por las TLs. La proporción entre estas dos posibilidades condiciona la forma de la curva J-V, la cual se va a describir en apartados siguientes.

1.5.2. Circuito equivalente

El modelo de circuito equivalente de una celda fotovoltaica ideal se muestra en la

Figura 4 a. Este circuito está formado por una fuente de corriente en paralelo con un diodo. Podría utilizarse un modelo más real con una resistencia de derivación (R_{sh} o R_p) en paralelo y otra resistencia en serie (R_s) (ver

Figura 4 b), pero para simplificar la comprensión del funcionamiento de la celda y las ecuaciones que le corresponden se usa el modelo a.

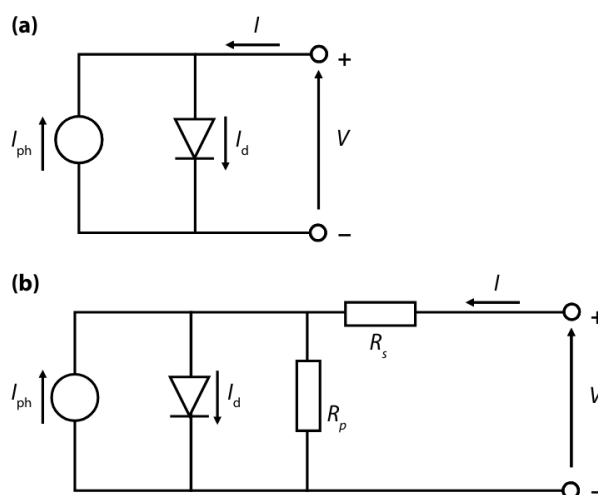


Figura 4. Circuito equivalente de (a) una celda fotovoltaica ideal y (b) una celda fotovoltaica real (Jäger et al., 2014).

A partir de la Ecuación 2 se puede llegar a obtener otros parámetros útiles para la caracterización de las propiedades de la celda fotovoltaica.

En las ecuaciones siguientes se va adaptando esta ecuación hasta aislar el factor de idealidad del diodo. Se empieza moviendo la densidad de corriente fotogenerada y la densidad de corriente inversa de saturación del lado derecho al izquierdo de la igualdad

$$J + J_{ph} = J_s \left(\exp \left[\frac{qV}{mKT} \right] - 1 \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{J + J_{ph}}{J_s} = \left(\exp \left[\frac{qV}{mKT} \right] - 1 \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Se sigue adaptando la ecuación, buscando el logaritmo neperiano de ambos lados de la igualdad

$$\ln \left(\frac{J + J_{ph}}{J_s} + 1 \right) = \ln \left(\exp \left[\frac{qV}{mKT} \right] \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Sabiendo que el sumatorio de la densidad de corriente a bornas de la celda y la densidad de corriente fotogenerada es muy superior a la densidad de corriente inversa de saturación, se puede eliminar el 1 dentro del paréntesis del logaritmo de la izquierda de la igualdad, pues resulta insignificante en comparación al resto

$$(J + J_{ph}) \gg J_s \rightarrow \frac{J + J_{ph}}{J_s} \gg 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

En la parte derecha de la igualdad, el logaritmo neperiano y la exponencial se contrarrestan entre ellas, desapareciendo de la ecuación

$$\ln \left(\frac{J + J_{ph}}{J_s} \right) = \frac{qV}{mKT} \quad \text{Ecuación 7}$$

Se aplica la propiedad del logaritmo que dictamina que el logaritmo de una división entre dos valores es igual a la sustracción del logaritmo del numerador con el logaritmo del denominador

$$\ln(J + J_{ph}) - \ln(J_s) = \frac{qV}{mKT} \quad \text{Ecuación 8}$$

Se sigue adaptando la ecuación, buscando la derivada del voltaje en ambos lados de la igualdad y adaptando los parámetros para simplificar la ecuación

$$\frac{\partial}{\partial V} (\ln(J + J_{ph})) = \frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{qV}{mKT} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\frac{\frac{\partial}{\partial V} (J + J_{ph})}{J + J_{ph}} = \frac{q}{mKT} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\frac{\frac{\partial J}{\partial V} + \frac{\partial J_{ph}}{\partial V}}{J + J_{ph}} = \frac{q}{mKT} \quad \text{Ecuación 11}$$

Sabiendo que la derivada de la densidad de corriente a bornas de la celda sobre el voltaje es muy superior a la derivada de la densidad de corriente fotogenerada sobre el voltaje, se puede eliminar esta última de la ecuación

$$\frac{\frac{\partial J}{\partial V}}{J + J_{ph}} = \frac{q}{mKT} \quad \text{Ecuación 12}$$

Finalmente se aísla el factor de idealidad del diodo, quedando como la fracción de la carga del electrón entre la constante de Boltzmann y la temperatura absoluta del diodo por la fracción de la densidad de corriente a bornas de la celda más la densidad de corriente fotogenerada entre la derivada de la densidad de corriente a bornas de la celda sobre el voltaje aplicado:

$$m = \frac{q}{KT} \cdot \frac{(J + J_{ph})}{\frac{\partial J}{\partial V}} \quad \text{Ecuación 13}$$

1.5.3. Curva corriente-voltaje

Los parámetros más importantes para la caracterización de una celda fotovoltaica son la potencia máxima P_{max} o del punto de máxima potencia P_{mpp} , la densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} , la tensión de circuito abierto V_{oc} , el factor de llenado FF y la eficiencia de conversión de potencia PCE . Se puede observar en la *Figura 5* cómo la potencia máxima se produce cuando se genera J_{mpp} aplicando a la celda una tensión V_{mpp} . El valor de V_{oc} se identifica con aquel cuando la corriente neta a través de la celda es nula. Análogamente, el valor de J_{sc} se identifica con aquel cuando el voltaje entre las bornas de la celda es nulo. El FF es un parámetro empírico que está determinado por la fracción que representa la potencia $P_{mpp} = J_{mpp} \cdot V_{mpp}$ con respecto a la potencia ideal (pero físicamente imposible) de una J-V cuadrada de lados J_{sc} y V_{oc} .

$$FF = \frac{J_{mpp} \cdot V_{mpp}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad \text{Ecuación 14}$$

El PCE es la proporción entre la potencia eléctrica generada a través de la celda solar y la potencia de luz recibida por esta. A continuación, se muestra esta ecuación:

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Otro indicador en la degradación de una celda solar es la tasa de degradación global efectiva ($DR_{\Delta\tau}$), la cual mide la variación de PCE en un intervalo de tiempo (habitualmente 200h o 1000h) (Almora et al., 2023). A continuación, se muestra la ecuación de este indicador mencionado:

$$DR_{\Delta\tau} = \frac{PCE(\tau) - PCE(0)}{\Delta\tau} \quad \text{Ecuación 16}$$

Una de las representaciones más ilustrativas del funcionamiento de una celda fotovoltaica es la conocida curva J-V, tal y como se puede observar en la *Figura 5*. Este diagrama permite ver la relación entre la densidad de corriente J y la tensión aplicada V entre los electrodos de la celda fotovoltaica.

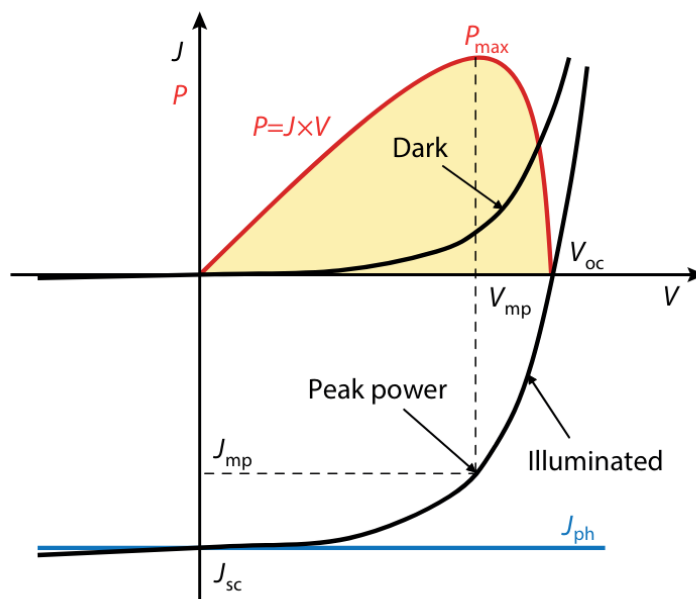


Figura 5. Caracterización J-V de una celda fotovoltaica ante oscuridad e iluminación (Jäger et al., 2014).

1.5.4. Eficiencia de conversión de potencia

La eficiencia de conversión de potencia en una celda solar se entiende como la fracción entre la potencia de salida y la potencia de entrada, es decir, la potencia generada respecto a aquella que incide sobre la celda solar:

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{Ecuación 17}$$

La potencia de salida es un valor que se calcula de la multiplicación de la densidad de corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia de la curva J-V en la celda solar:

$$P_{out} = J_{mpp} \cdot V_{mpp} = FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} \quad \text{Ecuación 18}$$

Por lo tanto, la eficiencia resulta una función de los parámetros de la curva J-V y la potencia incidente:

$$PCE = \frac{J_{mpp} \cdot V_{mpp}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad \text{Ecuación 19}$$

La potencia de entrada o incidente es un valor que depende de muchos más factores. A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten el cálculo de la potencia de entrada en unidades de $W \cdot cm^{-2}$.

En la siguiente ecuación se puede observar como la potencia de entrada, la que reciben las celdas solares procedentes de las lámparas, es una integral en todo el rango de longitudes de onda de la irradiancia espectral incidente $\Gamma_{in}(\lambda)$, en unidades de $W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1}$

$$P_{in} = \int_0^{\infty} \Gamma_{in}(\lambda) d\lambda \quad \text{Ecuación 20}$$

La ecuación de la irradiancia espectral incidente se compone a su vez de la multiplicación entre el coeficiente de intensidad P_a , en unidades de $W \cdot cm^{-2}$, y la irradiancia espectral normalizada $s(\lambda)$, en unidades de nm^{-1}

$$\Gamma_{in}(\lambda) = P_a \cdot s(\lambda) \quad \text{Ecuación 21}$$

El coeficiente de intensidad depende de la potencia de alimentación de la lámpara, así como la distancia entre la celda solar y esta. Por el contrario, la irradiancia espectral normalizada no depende de parámetros operacionales como la temperatura, además, para trabajar con valores adimensionales, se calcula su integral en todo el rango de longitudes de onda, así este valor puede asumirse como constante para cada fuente de irradiación

$$S = \int_0^{\infty} s(\lambda) d\lambda \quad \text{Ecuación 22}$$

La ecuación de la luminiscencia incidente L_{in} , en unidades de lux ($lm \cdot cm^{-2}$), queda determinada por el factor de conversión K_{cd} de $683 \text{ lm} \cdot W^{-1}$ y la integral en todo el rango de longitud de onda de la irradiancia espectral incidente por la respuesta fotópica del espectro humano $v(\lambda)$ en unidades adimensionales

$$L_{in} = K_{cd} \int_0^{\infty} \Gamma_{in}(\lambda) v(\lambda) d\lambda \quad \text{Ecuación 23}$$

Igual como se había realizado con la irradiancia espectral normalizada, con la respuesta fotópica del espectro humano también se trabaja con su valor adimensional a partir de la integral de este a lo largo del rango de longitud de onda y, de igual forma, también puede asumirse como constante para cada fuente de irradiación

$$V = \int_0^{\infty} s(\lambda)v(\lambda)d\lambda \quad \text{Ecuación 24}$$

Así, el único valor desconocido sería el coeficiente de intensidad, que quedaría definido por la siguiente ecuación, creada a partir de

$$P_a = \frac{L_{in}}{K_{cd} \cdot V} \quad \text{Ecuación 25}$$

Para finalmente obtener la ecuación de la potencia de entrada, aquella que recibe la celda solar procedente de las distintas lámparas del laboratorio. Esta ecuación queda como la fracción entre la luminiscencia incidente por el adimensional de la irradiancia espectral normalizada, como numerador, y el factor de conversión por el adimensional de la respuesta fotópica del espectro humano, como denominador (Lübke et al., 2021), (Almora et al., 2024).

$$P_{in} = \frac{L_{in} \cdot S}{K_{cd} \cdot V} \quad \text{Ecuación 26}$$

Por lo tanto, la eficiencia en condiciones de iluminación interior resulta:

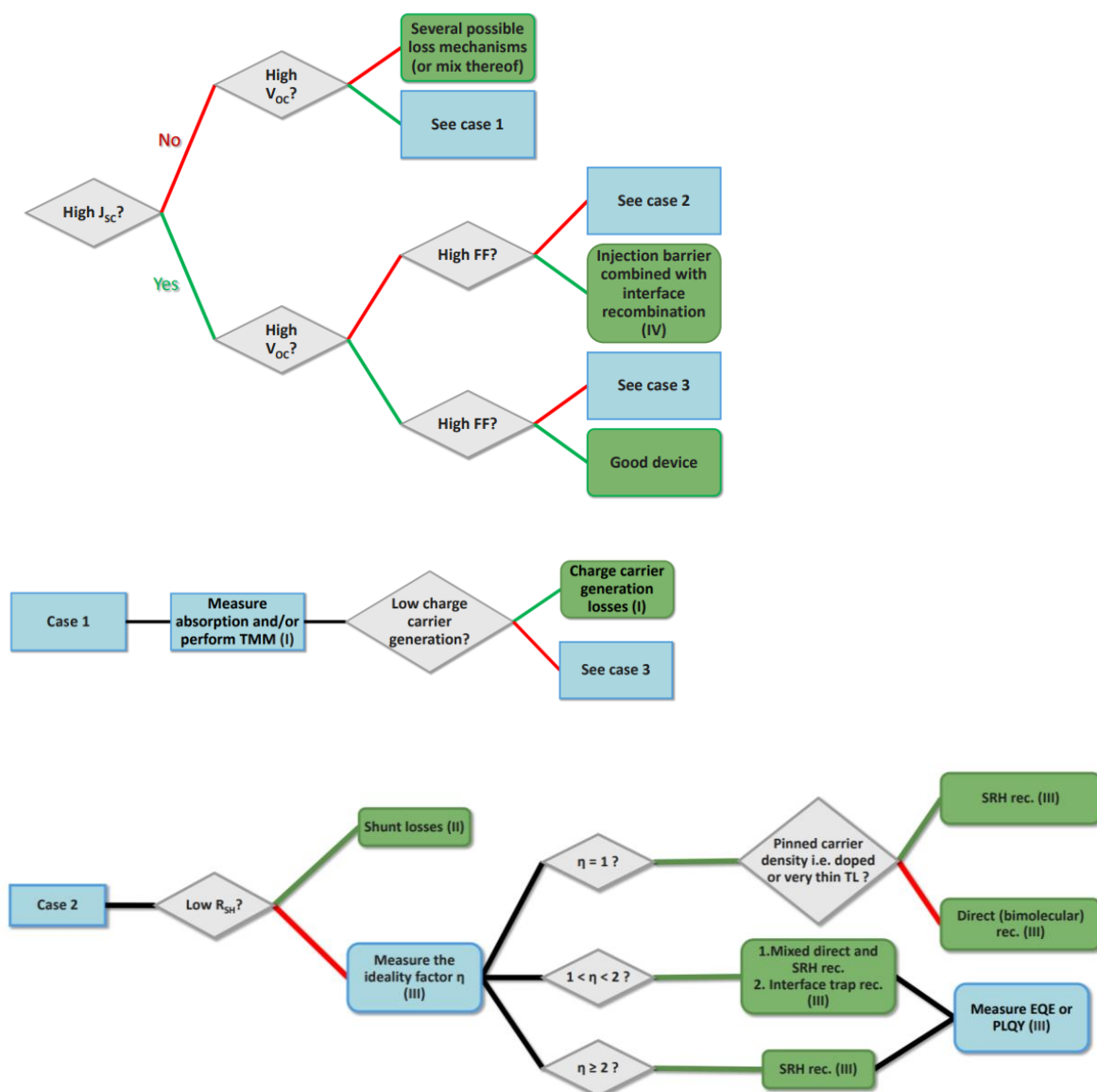
$$PCE = \frac{J_{mpp} \cdot V_{mpp} \cdot K_{cd} \cdot V}{L_{in} \cdot S} = \frac{FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot K_{cd} \cdot V}{L_{in} \cdot S} \quad \text{Ecuación 27}$$

Notablemente, en la publicación de (These et al., 2024) desarrollan un diagrama de flujo (ver *Figura 6*) para determinar el motivo de la pérdida de eficiencia en una celda solar en función de los parámetros eléctricos medidos, aquellos obtenidos a partir de la curva J-V. Según esta referencia, se puede determinar como causa de reducción de eficiencia las 8 pérdidas siguientes para PSCs y OSCs:

1. Pérdidas de generación de portadores de carga. Este caso particular se da cuando el valor de J_{sc} no es elevado, pero sí lo es el valor de V_{oc} , y presenta una baja generación de portadores de carga. Este último parámetro puede deberse a una baja absorción del material de la AL o a una AL muy delgada o transparente. También puede deberse a una absorción parasitaria de las otras capas, que impide que la AL pueda absorber la totalidad de energía recibida.
2. Pérdidas de resistencia de derivación. Este caso particular se da cuando el valor de J_{sc} sí es elevado, pero no lo son los valores de V_{oc} y FF. Si estos dos últimos parámetros decrecen en reducir la iluminación, eso indica que la resistencia de derivación es baja y este es un factor importante en cuanto a pérdidas. Otro método para percibir la presencia de estas pérdidas es la representación de la J_{sc} en oscuridad y bajo iluminación.
3. Pérdidas por recombinación. Si habiendo llegado al punto anterior, el valor de la resistencia de derivación es alto y, por tanto, no causante de pérdidas, se debe medir el factor de idealidad de la celda solar.
4. Pérdidas por barrera de inyección y atrapamiento en la interfaz entre la TL y la AL. Este caso particular se da cuando el valor de J_{sc} sí es elevado, además del valor de FF, pero no lo es el valor de V_{oc} .
5. Pérdidas iónicas. Este caso particular se da cuando el valor de J_{sc} sí es elevado, además del valor del valor de V_{oc} , pero no lo es el FF. Si existe una gran concentración de iones, de ambas cargas, y estos no son bloqueados por las TLs, estos inducen efectos perjudiciales para la estabilidad a largo plazo y degrada las TLs y los electrodos.
6. Pérdidas de generación de portadores de carga dependientes del campo. Este caso particular se da cuando la pendiente de J_{sc} vs el logaritmo de la intensidad de la luz es alta.

7. Pérdidas de resistencia en serie. Este caso particular se da cuando la pendiente de J_{sc} vs el logaritmo de la intensidad de la luz es baja e indica que la resistencia en serie es demasiado grande. También se puede observar graficando FF vs el logaritmo de la intensidad de la luz y viendo que, antes de llegar a 1 sol, el valor de FF decrece cuantiosamente.
8. Pérdidas por extracción y transporte. Habiendo descartado las pérdidas por resistencias, el siguiente paso es comprobar si la curva J-V presenta una forma de S. Si no es el caso, esto demuestra baja movilidad de electrones y huecos ante una baja FF. Podría tratarse también de una AL demasiado gruesa.

En la referencia se menciona que una buena celda solar tiene valores altos de J_{sc} , V_{oc} y FF. Por otro lado, en un dispositivo con todos estos valores bajos es difícil determinar el motivo principal de las pérdidas, por lo que podría tratarse de varias de ellas.



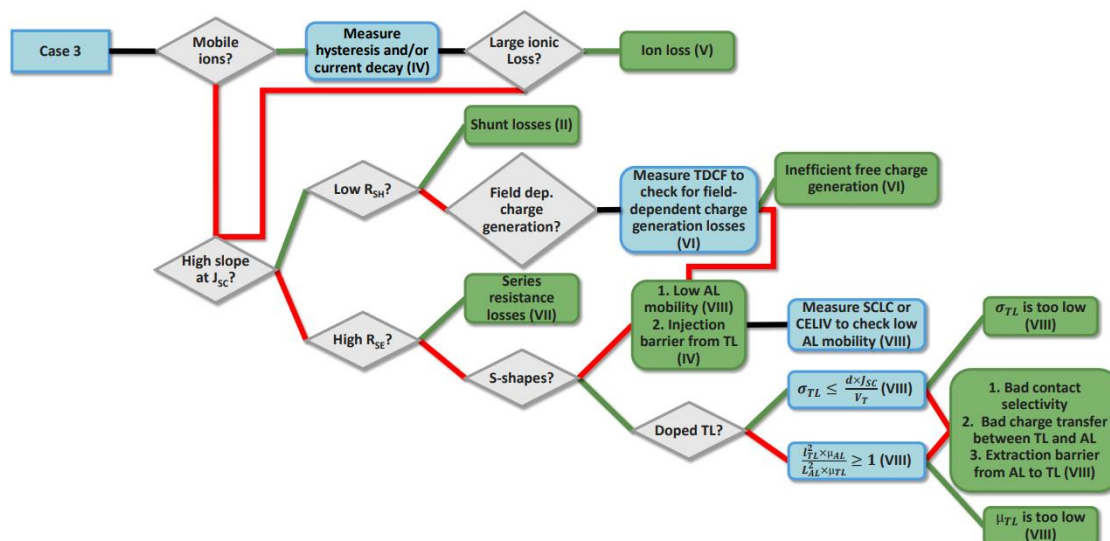


Figura 6. Diagrama de flujo para analizar la curva J-V en PSCs y OSCs (These et al., 2024).

1.6. Objetivos y perspectiva

Este proyecto se alinea con el desarrollo de tecnologías de generación de energía con fuentes renovables, particularmente celdas fotovoltaicas, y específicamente a partir de la optimización de celdas solares de perovskita y orgánicas.

Como objetivos generales, se definen los siguientes dos elementos fundamentales:

1. Desarrollo de un sistema de medición automatizado para el testeo de la estabilidad operacional de celdas solares.
2. Evaluación preliminar de rendimiento y estabilidad operacional de celdas solares de tecnologías emergentes.

Para la consecución de los objetivos generales, se trazaron tres grupos fundamentales de objetivos específicos que cubren aspectos físico-teóricos, de implementación electrónica y de caracterización experimental. Entre los objetivos específicos relacionados con los formalismos de la física de los dispositivos semiconductores, se encuentran:

- i. Familiarización con los conceptos de dopaje y semiconductores, juntura p-n, energía de bandgap, electrones y huecos, generación y recombinación de portadores de carga, estructura de celdas solares.
- ii. Dominio de los conceptos de PCE, J_{sc} , Voc, FF, m, MPP y DR.

En relación con la implementación de sistema de medición para testear de la estabilidad, los principales objetivos específicos fueron:

- iii. Integración de multímetros y fuente de potencial en interfaz LabView para la medición de curvas J-V, rastreo de MPP y comprobación de variables in situ durante test de estabilidad operacional.
- iv. Desarrollo de medidor de voltaje, temperatura y humedad con microcontrolador Arduino e interfaz de LabView, acoplado al testeo de estabilidad operacional.
- v. Desarrollo y optimización de soportes (holders) para caracterización optoelectrónica de celdas solares de tecnologías emergentes.

Respecto a los objetivos específicos de caracterización experimental, se planteó el alcance de:

- vi. Dominio de la caracterización J-V bajo irradiancia de 1 sol en el simulador solar y diferentes fuentes de iluminación de interior en el rango de 200 lux a 5000 lux para el cálculo de PCE, J_{sc} , Voc, FF, m y R.
- vii. Análisis de celdas solares durante testeos de estabilidad operacional, con atención a los parámetros de PCE, J_{sc} , Voc, FF, m, MPP y R.

1.7. Antecedentes

Este proyecto se lleva a cabo en el contexto de las líneas de investigación sobre optimización de rendimiento y estabilidad de celdas solares de tecnologías emergentes en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Automática de la Universidad Rovira i Virgili (URV) de Tarragona, y en colaboración con el Instituto de Materiales Avanzados de la Universidad Jaume I (UJI) de Castellón.

El autor del presente trabajo es graduado de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. De esta manera, al inicio del proyecto, contaba con entrenamiento básico para la implementación con Arduino y Programación con LabVIEW, y operación de mediciones de corriente y voltaje. También estaba familiarizado con principios básicos de funcionamiento de celdas solares.

Las instalaciones en la URV incluyeron un laboratorio de fabricación de celdas orgánicas y uno de caracterización. La elaboración de muestras para su posterior análisis no fue desarrollada por el autor de este trabajo, quien recibió los dispositivos tipo OSC y PSC ya fabricados en la URV y la UJI, respectivamente. Por otro lado, al inicio del proyecto, el laboratorio de caracterización incluía, entre otros, un simulador solar, el sistema de medición de EQE y varios multímetros y fuentes de generación de potencial. También existían versiones anteriores de interfaces automatizadas de Labview para algunos de los instrumentos y solo para medir curvas J-V, no habiendo precedentes de testeo y rastreo de MPP y estabilidad. Además, los soportes (holders) de muestra solo estaban diseñados para OSCs de la URV y tenían dimensiones inconvenientes para algunas mediciones. Por lo tanto, la adquisición de sensores, el microcontrolador Arduino, fuentes de iluminación, y demás componentes para la integración del sistema de medición y el estudio de estabilidad, incluyendo nuevos soportes, implicó una novedad y un paso de desarrollo significativo para el laboratorio.

2. Metodología

2.1. Muestras y estructuras de soporte

Para la toma de medidas en la realización de este proyecto se han usado dos muestras de celdas solares distintas, unas orgánicas (OSC) provistas por el Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática de la Universidad Rovira y Virgili de Tarragona (Mohamed Samir Habib) y otras de perovskita (PSC) provistas por el Instituto de Materiales Avanzados de la Universidad Jaume I de Castellón.

2.1.1. Muestras de celdas solares orgánicas

Las muestras de celdas orgánicas utilizadas tienen la estructura del esquema de la

Figura 7 a, que cuenta con electrodos posteriores de plata, ETL de PDINO ($C_{34}H_{32}N_4O_6$), capa activa de D18 como donante y Y6 ($C_{82}H_{86}Cl_4N_8O_2S_5$, BTP-4F) como aceptador, HTL de PEDOT:PSS (Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato)) y TCO de ITO como electrodo delantero. Los píxeles están distribuidos a lo largo de la celda como se puede apreciar en la

Figura 7 b, con un total de 4 píxeles distribuidos uno en cada cuadrante de la celda y con el conector común (puntos de plata GND, por su etiqueta en inglés) para contacto al ITO de la celda, duplicado en dos lados opuestos transversalmente a la dirección de los electrodos de plata. Este tipo de celdas cuentan con un área útil de 0.15 cm^2 . La tecnología utilizada para la fabricación de estas celdas consiste en la superposición de capas por técnicas basadas en disolución (e.g., recubrimiento giratorio o spin coating), con un posterior tratamiento de vacío a baja presión y un recocido térmico directo al final (Samir et al., s. f.).

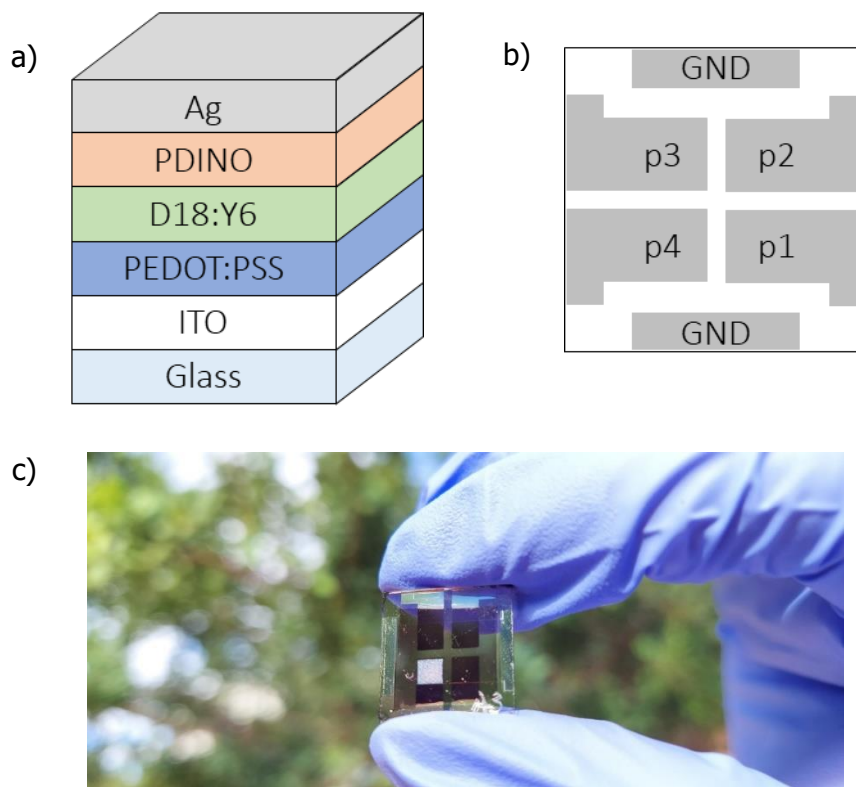


Figura 7. a) Estructura de capas, b) disposición de píxeles y c) fotografía de una muestra de OSC con un pixel (plateado) degradado en MPP y el resto en circuito abierto durante un test de estabilidad. Fotografía cedida por la Dra. Magaly Estrada.

2.1.2. Muestras de celdas solares de perovskita

De las muestras de perovskita similarmente se dispone de la estructura de capas de las celdas solares esquematizada en la *Figura 8 a*. Este tipo de celdas solares de PSC cuentan con electrodos posteriores de oro; ETL de PCBM ([6,6]fenil-C61-ácido butírico metil éster); capa activa de CsPbI₃; una HTL compuesta por la secuencia C60, BCP y PEDOT:PSS (Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato)); y el electrodo delantero formado por ITO. Los píxeles o diodos *Figura 8 b*, con un total de 5 píxeles distribuidos uno al lado del otro en un lado de la celda solar y con el contacto común de la celda en el lado opuesto. Este tipo de celdas cuentan con un área útil de 0.25 cm².

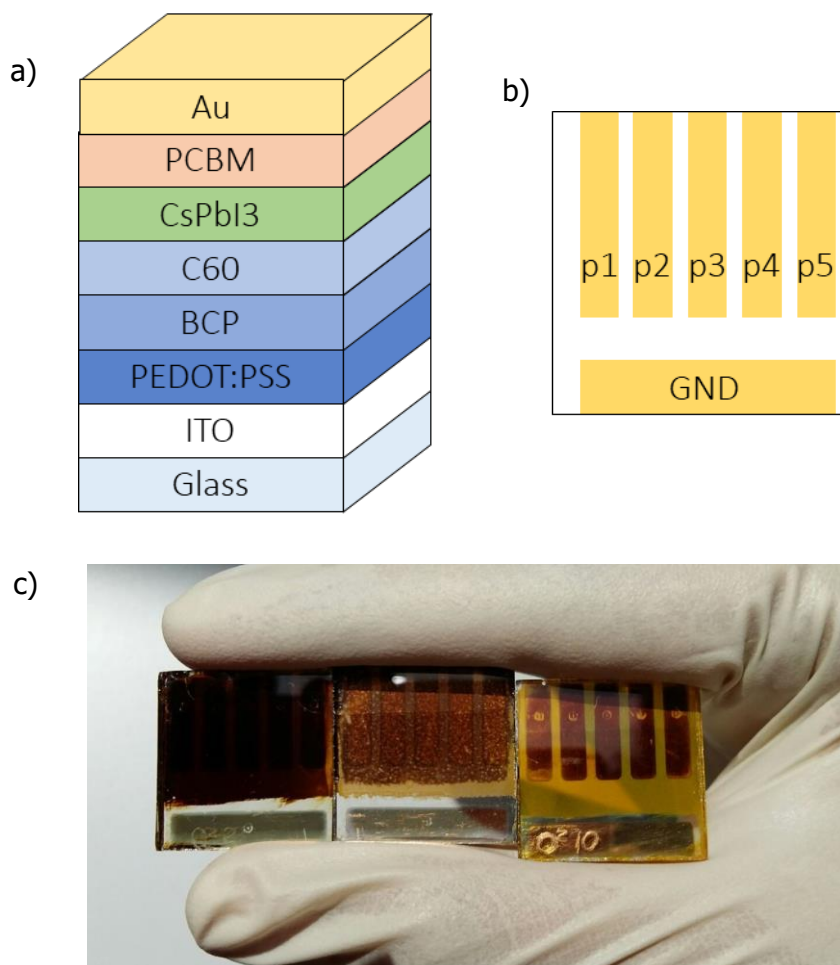


Figura 8. a) Estructura de capas, b) disposición de píxeles o diodos y c) fotografía de muestras de PSC en diferentes estados de degradación (Almora et al., 2017).

2.1.3. Estructuras de soporte (holders)

Para la toma de medidas de las celdas solares en el laboratorio se han usado estructuras o dispositivos que permiten el soporte y la protección de las muestras. Estas estructuras de soporte, típicamente llamadas holders por su nombre en inglés, son distintas para cada tipología de muestra, atendiendo a la dimensión y distribución de sus píxeles o diodos.

Los dos soportes utilizados tienen 4 tornillos que permiten la fijación de las celdas solares y las presionan contra los pines metálicos de resorte que se encuentran debajo para permitir la conectividad de los píxeles con los conectores banana de salida. La estructura de soporte para las muestras de OSCs cuenta con 5 bananas (4 píxeles y 1 común) y la estructura de soporte para las muestras de PSCs cuenta con 6 bananas (5 píxeles y 1 común). La orientación de las celdas es muy intuitiva para las muestras de PSC, pues se deben poner los píxeles encima de los pines metálicos. Sin embargo, para las muestras de OSC se debe colocar el píxel 1 (marcado con la identificación de la muestra) en el extremo inferior derecho (colocando la estructura como se ve en la *Figura 9 a)*).

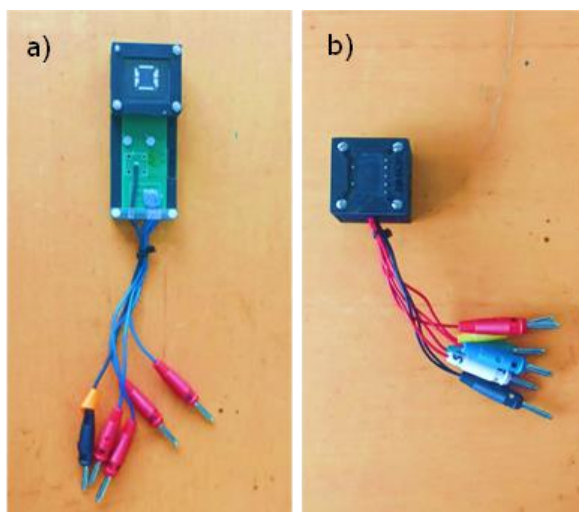


Figura 9. Estructuras de soporte para las muestras de a) OSC y b) PSC.

El cerrado de las muestras incluye una ventana de cristal que provee cierto nivel de aislamiento atmosférico para el soporte de OSCs, pero produce demoras de operación por la fijación de tuercas de rosca. En el caso del soporte para PSCs, el cierre es de corredera, lo que reduce los tiempos de operación, pero no provee aislamiento atmosférico.

2.2. Estación de testeo de degradación

La estación para el testeo de la degradación de las celdas fotovoltaicas está formada por los siguientes elementos y equipos:

1. Fuente de irradiancia. Dependiendo de los requerimientos del experimento, esta puede ser:
 - Simulador solar modelo SUN 2000 Solar Simulator 11000 del fabricante ABET Technologies. Fuente de luz basada en una lámpara de Xenón de 150W e irradiación de 1 sol (calibrado usando una referencia de celda de silicio). Incluye lentes condensadoras de luz N-BK7. El área de irradiación para este modelo es de 55x55 mm. La modificación de intensidad de irradiancia en este simulador debe hacerse mediante filtros o cambio de distancia fuente-muestra.
 - Fuente con potencia (RS-300SP del fabricante RS PRO con interfaz RS232-USB) y lámparas variables. La modificación de intensidad de irradiancia es posible con filtros, cambio de distancia fuente-muestra o control de potencia de alimentación a la lámpara.

- Fuente de 12 V DC con lámparas variables y modificación de intensidad de irradiancia por filtros o cambio de distancia fuente-muestra.
- Fuente de 220 V AC con lámparas variables y modificación de intensidad de irradiancia por filtros o cambio de distancia fuente-muestra.
- 2. Unidad de medida y fuente (SMU, por sus siglas en inglés) para medición de las muestras. Dependiendo de los requerimientos del experimento, estas pueden ser:
 - SMU modelo 2400 del fabricante KEITHLEY con interfaz GPIB. Este equipo en particular incluye las conexiones de control RS232 del obturador (shutter) de iluminación del simulador solar.
 - SMU modelo 2611A del fabricante KEITHLEY con interfaz GPIB.
 - Multímetro modelo 2831E del fabricante BK PRECISION con interfaz RS232-USB en combinación con fuente S-300SP del fabricante RS PRO con interfaz RS232-USB.
- 3. Cámara de degradación o jaula de Faraday diseñada para aislamiento luminoso y electromagnético. Además, incluye
 - Conector para lámpara con sistema de enfriamiento (ventilador axial MA2062-HVL.GN del fabricante Sunon y disipador de aluminio HS-DC-1/2-LFC-17 del fabricante SPREADFAST),
 - Sensor de temperatura y humedad (DHT22) con kit Arduino UNO y microcontrolador ATmega328P
 - y Conexiones para contactos

Otros equipos como el multímetro modelo 177 del fabricante FLUKE y el Luxómetro modelo ILM-01 del fabricante RS PRO se utilizaron para el control de intensidades de corriente, luz y voltajes. Además, los espectros de las lámparas utilizadas en los experimentos de iluminación interior fueron adquiridos por un espectrofluorímetro Horiba Jobin Yvon Fluorolog, y las medidas de eficiencia cuántica externa se hicieron con la estación IPCE-DC, LS1109-232 de fabricante Lasing, S.A. y el sistema de unidad de medidor de potencia modelo 2936-R del fabricante Newport.

2.2.1. Procedimiento en la toma de medidas

El procedimiento habitual en el laboratorio empieza por caracterizar la curva J-V de la celda solar con el simulador solar y posteriormente realizar un seguimiento de los valores eléctricos bajo la iluminación de una lámpara en la cámara de degradación. La comparación de los resultados de las curvas J-V en diferentes intensidades de irradiancia y espectros de lámparas permite entender el comportamiento de las muestras en un sentido más amplio y versátil. Además, se puede ejecutar el programa de seguimiento del punto de potencia máxima para obtener, además de distintas curvas J-V, la evolución de variables eléctricas en función del tiempo de degradación en que la celda está expuesta a luz y diferentes condiciones de polarización. A continuación, se enumeran los pasos a seguir para realizar estas mediciones. Las mediciones se realizan de forma individual para cada píxel de la celda solar.

Para la obtención de los valores eléctricos correspondientes a las curvas J-V en el SIMULADOR SOLAR, se realizan los siguientes pasos:

1. Encendido y posicionamiento de equipos y muestra:
 - a. Encender el ordenador del laboratorio y abrir el programa LabVIEW con la programación para obtención de curvas J-V.
 - b. Encender el ventilador del simulador solar con el interruptor trasero del equipo y encender la lámpara de 1 sol con los interruptores en LAMP

- ON, control de obturador en INTERNAL (EXTERNAL para acciones desde el ordenador) y obturador en CLOSE, preferentemente 30 min antes de hacer uso de este equipo para asegurar valores con respuestas del equipo estacionarias.
- c. Encender el SMU para la medición de corriente y voltaje
 - d. Fijar la celda solar en la estructura de soporte pertinente con la ayuda de pinzas y asegurando la rosca de los tornillos (o deslizamiento de la cubierta) y la correcta orientación de la celda en el soporte.
2. Calibración de la intensidad de irradiancia incidente:
- a. Colocar el fotodiodo de referencia en su estructura de soporte para igualar su altura con la correspondiente a la muestra en la estructura de soporte que se usará para medir, y asegurar que se encuentre fija en el área de iluminación del simulador solar.
 - b. Conectar en sus bornas de salida un multímetro (o al SMU), asegurando la polaridad en las conexiones para obtener valores de corriente DC y en unidad de mA.
 - c. Regular la altura de la estructura de soporte bajo el área de iluminación del simulador solar con la mesa elevadora de tijera, poniendo el interruptor del obturador en OPEN y obteniendo un valor de 1.35 mA. Mantener el interruptor del obturador en OPEN únicamente mientras se tomen medidas. Alternativamente, se puede medir la J-V del fotodiodo de referencia hasta que la corriente de corto circuito alcance el valor antes mencionado.
 - d. Sustituir el fotodiodo de referencia por la estructura de soporte y la muestra a medir bajo el área de iluminación del simulador solar y conectar sus bornas al equipo de fuente y medida que se vaya a utilizar para alimentar/medir la celda solar y comunicar esos valores al programa LabVIEW. Hay que asegurar que el equipo que se vaya a utilizar está alimentado, que el cable de comunicación entre éste y el PC del laboratorio está conectado.
3. Medición de curva J-V:
- a. En la interfaz del software de medición, introducir los valores de entrada necesarios para la medición, así como el nombre del documento y la carpeta donde se van a guardar los valores. Especificar el puerto de comunicación que se usa para la comunicación con el equipo de fuente y medida. Para conocer el puerto concreto donde está conectado buscar en Administrador de dispositivos del PC y en PUERTOS (COM y LTP).
 - b. Si el código de programación regula la apertura del obturador del simulador solar, poner el interruptor de control del obturador en EXTERNAL, si por el contrario se desea realizar la apertura del obturador de forma manual, poner el interruptor de control del obturador en INTERNAL e ir variando la apertura con OPEN/CLOSE.
4. Ejecutar el programa LabVIEW y pulsar el botón RUN para empezar la medición de los valores de la curva J-V con la iluminación del simulador solar.

Para la obtención de los valores eléctricos correspondientes a las curvas J-V en la CÁMARA DE DEGRADACIÓN, se realizan los siguientes pasos posteriormente a los del simulador solar:

1. Colocar la estructura de soporte con la celda solar dentro de la cámara de degradación, conectando las bananas de la estructura de soporte en las bornas internas de la cámara para poder conectarla a los equipos desde las bornas externas a la cámara.

2. Conectar las bornas externas de la cámara de degradación al equipo de fuente y medida que se vaya a utilizar para alimentar/medir la celda solar y comunicar esos valores al programa LabVIEW. Asegurar que el equipo que se vaya a utilizar está alimentado, que el cable de comunicación entre éste y el PC del laboratorio está conectado.
3. Introducir los valores de entrada necesarios para la medición, así como el nombre del documento y la carpeta donde se van a guardar los valores. Especificar el puerto de comunicación que se usa para la comunicación con el equipo de fuente y medida. Para conocer el puerto concreto donde está conectado buscar en Administrador de dispositivos del PC y en PUERTOS (COM y LTP).
4. Conectar los cables de alimentación de la lámpara de la cámara de degradación con la fuente de alimentación RS-300SP, en caso de que la lámpara vaya alimentada en DC, o de la fuente de tensión en alterna del laboratorio de electrónica, en caso de que la lámpara vaya alimentada en AC. Se aconseja conectar un multímetro en las bornas de la fuente de tensión AC para verificar que no se sobrepase la tensión máxima de alimentación de cada lámpara.
5. En caso de intentar obtener los valores iniciales del simulador solar con la lámpara en la cámara de degradación, realizar mediciones de calibrado, ejecutando el programa LabVIEW y pulsando el botón RUN para empezar la medición de los valores de la curva J-V. El calibrado se realiza hasta verificar que el valor I_{sc} obtenido con el simulador solar también se da con la lámpara en la cámara de degradación. Se irá regulando la altura de la estructura de soporte bajo el área de iluminación de la lámpara en la cámara de degradación con la mesa elevadora de tijera hasta lograr que los valores sean lo más cercanos posibles. A partir de este punto se empezará a tomar medidas de la curva J-V a los siguientes porcentajes de eficiencia: 100 (inicial), 95, 90, 85 y 80.
6. En caso de querer tomar medidas con iluminancias o lámparas distintas, se hará uso del luxómetro, colocando este en la misma posición y altura en la que se colocará la muestra. Se puede modificar la altura del luxómetro/muestra y la tensión de alimentación de la lámpara para obtener el valor de iluminancia deseado.

Para la obtención de los valores eléctricos correspondientes al seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) en la CÁMARA DE DEGRADACIÓN, se añaden los siguientes pasos a los anteriores:

7. Conectar los cables de alimentación y comunicación entre la estructura modular de Arduino y el sensor de temperatura y humedad DHT22, ubicado dentro de la cámara de degradación.
8. Conectar las bornas externas de la cámara de degradación a las bornas para bananas de la estructura modular de Arduino de los pines que se quieran medir en circuito abierto.
9. Conectar el cable de alimentación del Arduino al PC del laboratorio, abrir el programa Arduino IDE con la programación para la medición de tensiones, temperatura y humedad y ejecutar el programa sobre el microcontrolador del kit Arduino UNO, asegurando que se especifica el puerto de comunicación correcto. Para conocer el puerto concreto donde está conectado buscar en Administrador de dispositivos del PC y en PUERTOS (COM y LTP).

La puerta de la cámara de degradación debe estar siempre cerrada cuando se realicen mediciones. En la *Figura 10*, se muestra un esquema de la conexión de equipos mencionada en los pasos anteriores.

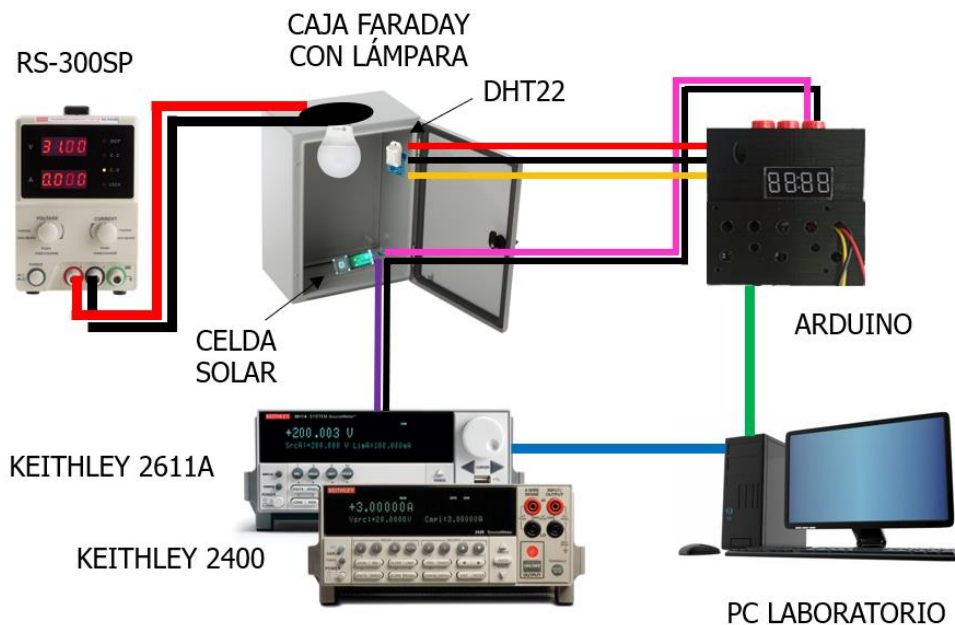


Figura 10. Estructura de conexionado de los equipos en la estación de testeo de degradación.

El siguiente esquema eléctrico en la *Figura 11* muestra de forma simplificada la medida de variables eléctricas en las celdas solares. Para la configuración de medidas en el punto de máxima potencia (MPP) se mide la tensión con un voltímetro en paralelo a la celda solar y la corriente con un amperímetro en serie con este. Además, se precisa una fuente de tensión DC para alimentar la celda solar. Para la configuración en circuito abierto (OC) se mide únicamente la tensión con un voltímetro en paralelo a la celda solar. Ambas configuraciones pueden ser usadas simultáneamente con píxeles distintos en una misma celda solar.

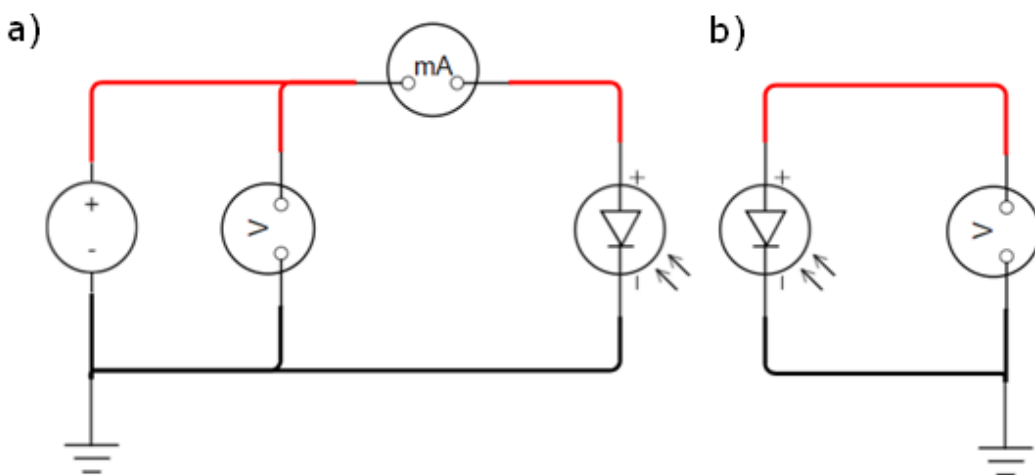


Figura 11. Esquema eléctrico para la adquisición en las celdas solares de variables eléctricas en configuración a) MPP y en b) OC, elaborado con la herramienta virtual smartdraw.com

2.2.2. Experimentos de temperatura del color

La temperatura del color de una fuente de luz se define comparando su color dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Esta medida se expresa en Kelvin y es la ley de Wien la que permite relacionar las longitudes de onda con las temperaturas a lo largo del espectro electromagnético. En general, los humanos dividimos el espectro de luz visible en tres franjas: color cálido (menor de 3000 K), color neutro (entre 3000 K y 4000 K) y color frío (mayor de 4000 K). Los límites entre las franjas no son los mismos para todos los países, los indicados anteriormente corresponden con aquellos aceptados en Europa (Lighting Style, s. f.).

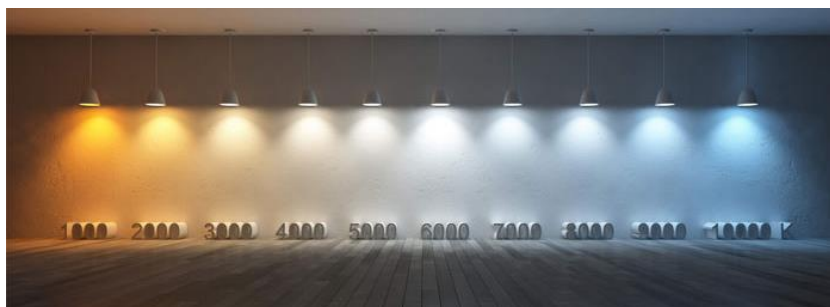


Figura 12. Representación visual de la temperatura del color (Lighting Style, s. f.).

La relación existente entre la temperatura del color y el consumo de energía expone que cuanto mayor es la temperatura del color, mayor es el consumo de energía. Esta relación se debe a que para lograr más altas temperaturas se precisa mayor potencia eléctrica consumida por la bombillas o mayor cantidad de LEDs. No existe una relación directa entre la temperatura del color y los lúmenes, aunque los humanos perciben como más brillantes las temperaturas más bajas. En cuanto a la relación entre temperatura de color y eficiencia, resalta los lúmenes/watt serán mayores con menores temperaturas pues, como se ha mencionado, el consumo de estos es menor (Lighting Style, s. f.).

Para realizar los experimentos de temperatura de color se usaron las lámparas listadas a continuación:

Tabla 3. Características de temperatura de color (K) y flujo luminoso (lm) para las distintas lámparas.

	Temperatura (K)	Flujo luminoso (lm)
LED 1	1500	160
LED 2	2200	235
LED 3	2700	250
LED 4	2700	1320
LED 5	2700	1521
LED 6	3000	806
LED 7	3000	950
LED 8	4000	806
LED 9	4000	1521
LED 10	4100	800
LED 11	6500	806

En la siguiente figura se muestra el espectro de estas lámparas, donde se puede apreciar la relación entre su espectro y la longitud de onda en la que emiten. En ella también se puede apreciar como las lámparas de menor temperatura muestran un espectro de menor magnitud. Para la obtención de las espectrometrías de las distintas lámparas se usó un espectrofluorímetro Horiba Jobin Yvon Fluorolog.

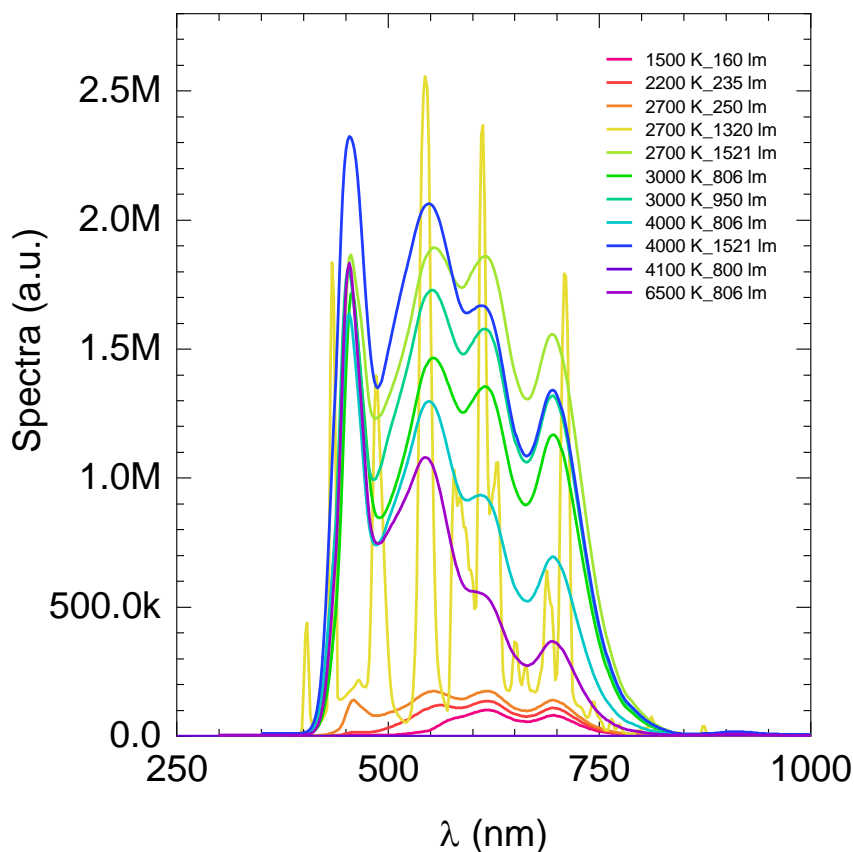
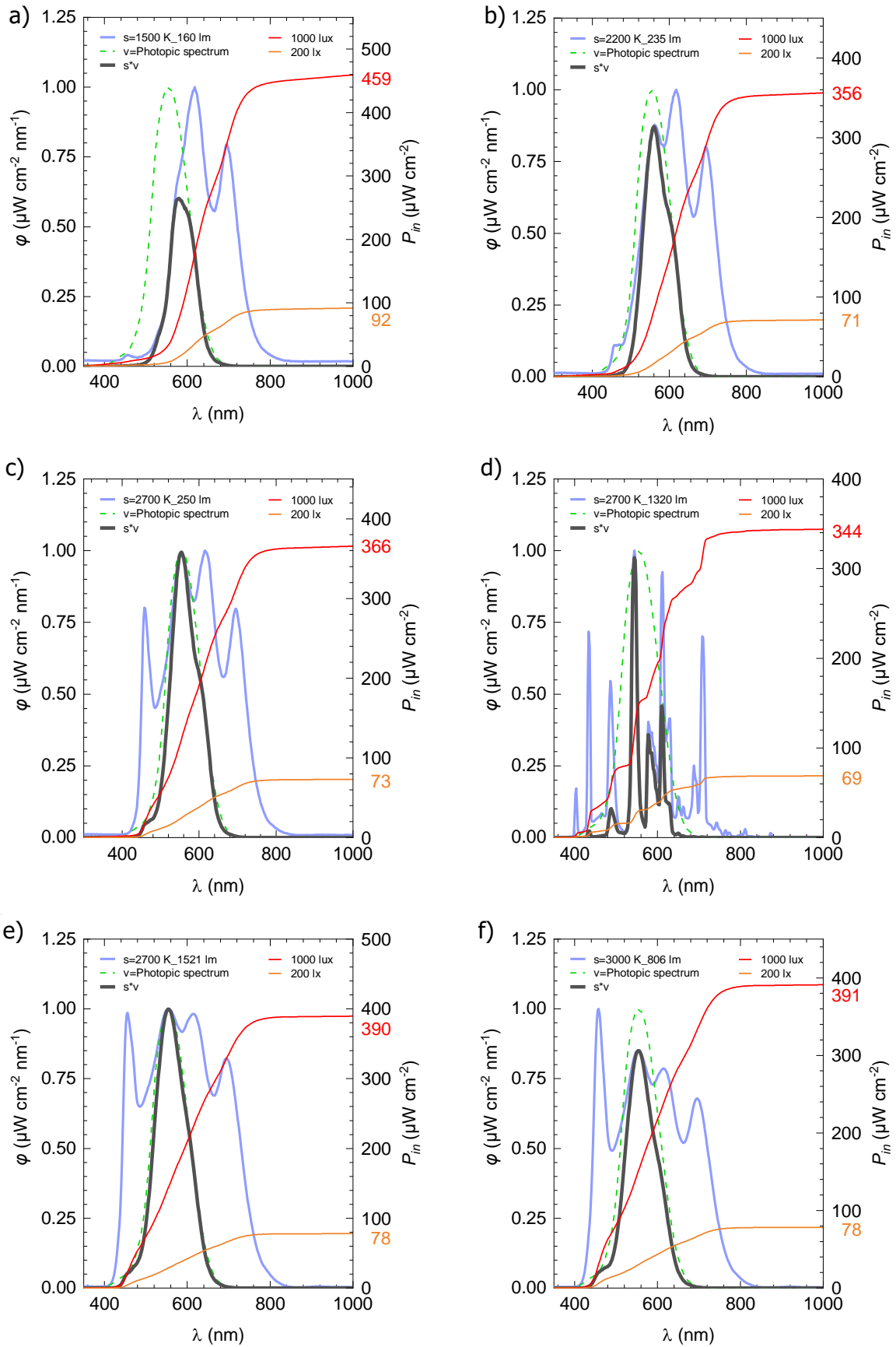


Figura 13. Espectros para las distintas lámparas.

A continuación, se muestra en la *Figura 14*, los espectros e integrales de potencia de entrada para las distintas lámparas a 200 y 1000 lux. Además, se puede ver también las formas de la irradiancia espectral normalizada y la respuesta fotópica del espectro humano a lo largo del rango de longitud de onda. En el eje izquierdo podemos ver φ en unidades $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ haciendo referencia a los dos parámetros anteriores. Seguidamente en la *Figura 15* se han representado las integrales de potencia para 1000 lux en función de la temperatura de color de cada lámpara usada para dichas medidas en el laboratorio.



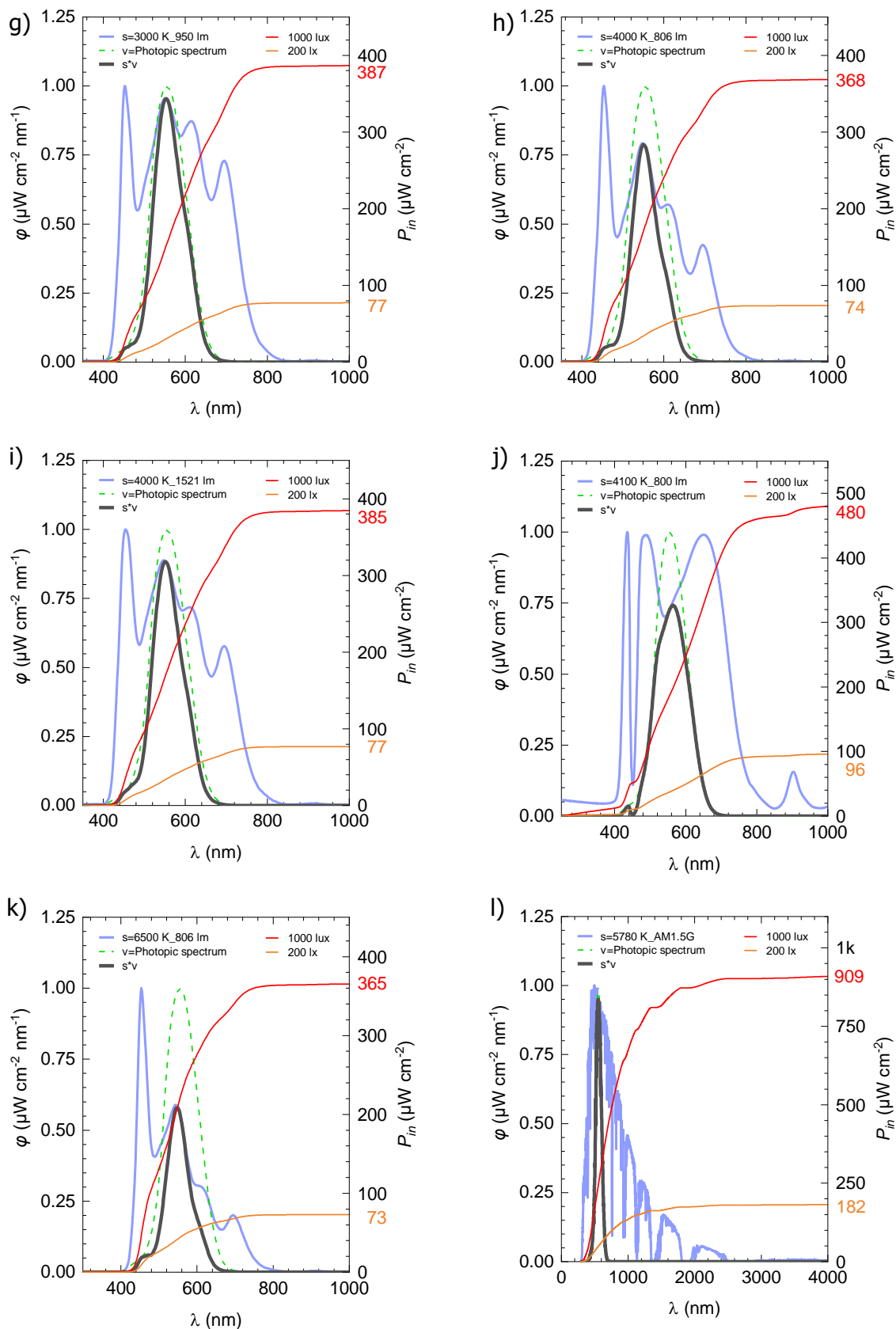


Figura 14. Espectros e integrales de potencia de entrada a 200 lux y 1000 lux para las distintas lámparas de a) 1500 K 160 lm, b) 2200 K 235 lm, c) 2700 K 250 lm, d) 2700 K 1320 lm, e) 2700 K 1521 lm, f) 3000 K 806 lm, g) 3000 K 950 lm, h) 4000 K 806 lm, i) 4000 K 1521 lm, j) 4100 K 800 lm k) 6500 K 806 lm y l) 5780 K AM1.5G.

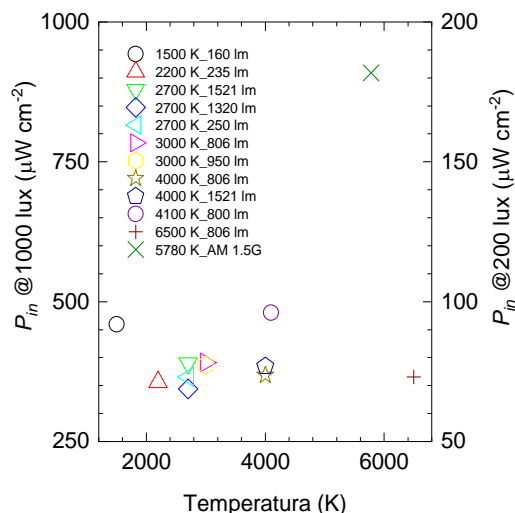


Figura 15. Integrales de potencia de entrada a 200 lux y 1000 lux para las temperaturas de las distintas lámparas.

Para realizar el siguiente experimento, se usó un fotodiodo de silicio y se midieron las curvas J-V con distintas iluminancias de 200 lux, 1000 lux y 2000 lux. Para ello se colocó el fotodiodo en el interior de la cámara de degradación usando en cada caso la lámpara pertinente. Para lograr la iluminancia correcta, se hizo uso de dos variables distintas: la proximidad entre el fotodiodo y la lámpara y la tensión de alimentación de esta. Existen algunos casos en los que estas dos variables no fueron suficientes para poder medir la curva J-V de forma óptima. Para comprobar la iluminancia correcta, se usó el luxómetro del fabricante RS PRO, modelo ILM-01. La inexactitud entre la ubicación exacta del luxómetro y el fotodiodo posteriormente y la variación en la medida del luxómetro pueden ser causas de errores leves en las curvas medidas. No se puede observar en la figura siguiente una relación entre las temperaturas y su curva J-V, pero sí se puede observar cómo exponiendo el fotodiodo a mayor iluminancia se obtienen densidades de corriente mayores, con potencias en su punto de máximo valor mayores. El motivo de que esto se produzca es que a mayor iluminancia, mayor potencia incide en la celda solar y mayor es la generación de portadores de carga.

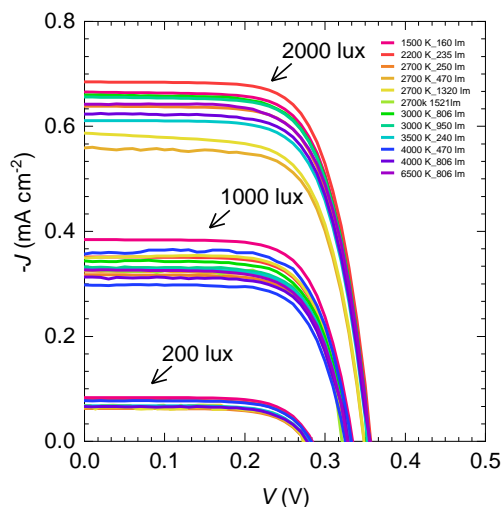


Figura 16. Curvas J-V para las distintas lámparas a 200 lux, 1000 lux y 2000 lux.

2.3. Software LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica, del fabricante National Instruments (NI), que permite desarrollar sistemas de pruebas. Estos sistemas de pruebas permiten la comunicación con cualquier instrumento, sea o no del mismo fabricante. Permiten crear una interfaz para controlar y monitorear estos instrumentos y posteriormente hacer un análisis de los resultados registrados, con la visualización de estos datos, el procesamiento de señales y la creación de reportes (National Instruments Corp., 2024).

Este software utiliza el lenguaje de programación gráfica de alto nivel "G", lo cual permite una programación con bloques, muy cercana al usuario y muy intuitiva. El programa dispone de dos paneles a programar: el panel frontal, entorno de interacción del programa para el usuario, y el diagrama de bloques, el cual contiene toda la lógica y criterios de procesamiento de datos de entrada y salida.

A continuación, se pretende detallar la lógica utilizada para la programación con el entorno LabVIEW. Inicialmente se detalla el funcionamiento general del código, enumerando las entradas, cálculos y salidas de este y, a continuación, se expone con un diagrama de flujo el funcionamiento de este código. Aunque para este proyecto se han elaborado dos tipos de códigos, uno para la medida de curvas J-V y otro para el seguimiento de la máxima potencia, únicamente se darán detalles del primero, pues es común en ambos códigos y representa la parte troncal de este proyecto.

El propósito del código de programación realizado es la obtención de la curva J-V, con todos los parámetros e indicadores que se detallaron en la introducción de este proyecto: V_{oc} , J_{sc} , P_{mpp} , V_{mpp} , J_{mpp} , FF y PCE. Para ello se realiza un barrido de tensión, aplicando un rango de tensiones en las bornas del píxel de la celda solar analizado, mientras tanto se mide la corriente que sale de ese píxel. Con los valores de voltaje y corriente obtenidos se realizan una serie de cálculos para obtener los parámetros e indicadores mencionados.

Existen dos tipos de entradas, aquellas introducidas por el usuario a través del panel frontal (internas) y aquellas obtenidas a través de instrumentos de medida (externas). Existen dos tipos de salidas, aquellas visibles por el usuario a través del panel frontal con gráficos y valores (internas) o aquellas guardadas en un documento de texto en el ordenador (externas). Esto se resume en la *Tabla 4*, donde además se listan las variables, abreviaturas y comentarios descriptivos.

Tabla 4. Entradas, cálculos y salidas utilizadas en la lógica de programación.

ENTRADAS		
I N T E R N A S	V_inicial (V)	Voltaje inicial en el que empieza el barrido.
	V_final (V)	Voltaje final en el que termina el barrido (a no ser que se aplique doble barrido, en cuyo caso es el valor intermedio al que llega antes de volver al valor inicial).
	V_step (V)	Escalón de voltaje que incrementa cada vez que se aplica voltaje durante el barrido.
	Scan rate (mV/s)	Ratio de escaneo usado para calcular el tiempo de retraso entre cada aplicación de voltaje durante el barrido.
	Area (cm ²)	Área útil de la celda solar para realizar los cálculos de densidad de corriente (J) a partir de la corriente (I) y potencia por unidad de área.
	Pin (mW/cm ²)	Potencia de entrada para realizar los cálculos de eficiencia (PCE).

	Bias step type	Tipo de incrementos para los escalones a escoger entre lineal o logarítmico.
	Bias sweep type	Tipo de barrido a escoger entre simple o doble, partiendo del voltaje inicial y terminando en el voltaje final para la primera opción y volviendo a realizar un barrido desde el valor final hasta el inicial para la segunda opción.
	Sourcemeater/VISA	Fuente y equipo de medida a escoger entre KEITHLEY 2400 o KEITHLEY 2611A. Con el desplegable VISA se escoge el puerto de comunicación con este equipo.
	File name	Nombre del documento donde se guardan los valores de las curvas J-V y los valores eléctricos calculados.
	File base path	Carpeta donde se guardan los valores de las curvas J-V y los valores eléctricos calculados.
E X T E R N A S	Voltaje medido (Voltage(V))	Medidas de voltaje obtenidas a partir de los equipos KEITHLEY 2400/KEITHLEY 2611A.
	Corriente medido (Current(A))	Medidas de corriente obtenidas a partir de los equipos KEITHLEY 2400/KEITHLEY 2611A.
CÁLCULOS		
	Vsweep	Función de código que genera a partir de los valores de V_inicial, V_final, V_step, Bias step type y Bias sweep type, la secuencia de voltajes a aplicar en la celda solar durante el barrido.
	J-V curve calculations	Función de código que genera a partir de los valores de voltaje y corriente de la curva J-V, área útil de la celda solar y potencia de entrada, los parámetros eléctricos de Jsc(mA/cm2), Voc(V), FF(%), PCE(%), Jmpp(mA/cm2), Vmpp(V), Pmax(mW/cm2), Pin(mA/cm2), Isc(A) y Impp(A).
SALIDAS		
I N T E R N A S	I-V Linear	Gráfico de la corriente, en A, en función del voltaje, en V.
	J-V Linear	Gráfico de la densidad de corriente, en A/cm2, en función del voltaje, en V.
	J-V LogLog	Gráfico de la densidad de corriente, en A/cm2, en función del voltaje, en V.
	P-V Linear	Gráfico de la potencia, en W/cm2, en función del voltaje, en V.
	Voc (V)	Valor de tensión en circuito abierto Voc, en V*.
	Jsc (mA/cm2)	Valor de densidad de corriente en cortocircuito Jsc, en mA/cm2*.
	FF (%)	Valor del factor de llenado FF, en %*.
	PCE(%)	Valor de eficiencia de conversión de potencia PCE, en %*.
	Pmax (mW/cm2)	Valor de potencia en su punto máximo Pmax, en mW/cm2*.
Jmpp (mA/cm2)	Valor de densidad de corriente en el punto de máxima potencia Jmpp, en mA/cm2*.	
Vmpp (V)	Valor de voltaje en el punto de máxima potencia Vmpp, en V*.	

	Isc (A)	Valor de corriente en cortocircuito Isc, en A*.
	Impp (A)	Valor de corriente en el punto de máxima potencia Impp, en A*.
	Arrays	Tabla con los valores eléctricos V(V), I(A), J(A/cm2), P(W/cm2), T(°C) y RH(%) a lo largo de todo el barrido. También hay una tabla con la secuencia de voltajes aplicados a lo largo del barrido.
E X T E R N A S	Voltaje aplicado (Voltage (V))	Valor de voltaje que se indica a los equipos KEITHLEY 2400/KEITHLEY 2611A para que lo aplique. Para indicar este valor al equipo correspondiente hace falta indicar el puerto de comunicación que se va a utilizar para ello.
	IV_S1_X.txt	Documento de texto donde se guardan los valores de la curva J-V y los valores eléctricos correspondientes al barrido desde el voltaje inicial al final. Las cabeceras de los valores de la curva J-V son t(s), V(V), I(A), J(A/cm2), P(W/cm2), T(°C) y RH(%). Las cabeceras de los valores eléctricos son Jsc(mA/cm2), Voc(V), FF(%), PCE(%), Jmpp(mA/cm2), Vmpp(V), Pmax(mW/cm2), Pin(mA/cm2), Isc(A) y Impp(A).
	IV_S2_X.txt	Documento de texto donde se guardan los valores eléctricos correspondientes al barrido desde el voltaje final al inicial, el barrido de vuelta al valor inicial. Las cabeceras de los valores eléctricos son Jsc(mA/cm2), Voc(V), FF(%), PCE(%), Jmpp(mA/cm2), Vmpp(V), Pmax(mW/cm2), Pin(mA/cm2), Isc(A) y Impp(A).

* Estos valores se muestran en el panel frontal, individuales para cada barrido (2 valores en caso de realizar doble barrido), después de realizar los cálculos eléctricos.

A continuación, en la *Figura 17* se muestra un diagrama de flujo, detallando el funcionamiento del código de programación de forma simplificada. En este diagrama se pueden apreciar los bucles en la ejecución del código, así como las etapas donde se introducen las entradas y se obtienen las salidas descritas anteriormente. También se detalla los puntos donde hay tiempos de retraso durante la ejecución del código de programación.

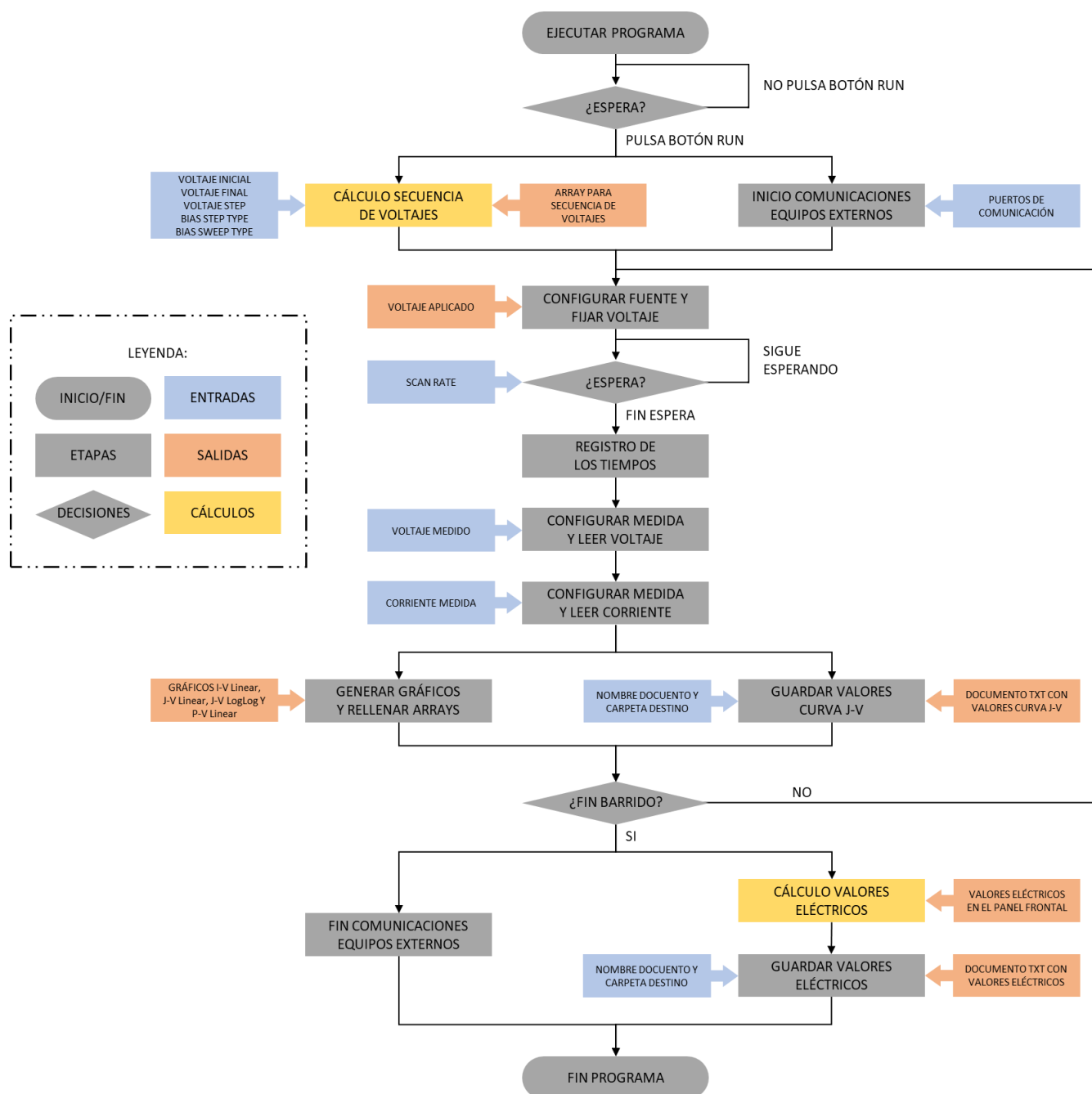


Figura 17. Diagrama de flujo en la programación J-V en LabVIEW.

En la *Figura 18* y *Figura 19* se muestra el diagrama de bloques de la lógica y el panel frontal de la programación J-V en LabVIEW, respectivamente. En el primer caso se puede apreciar con la ejecución secuencial de los bloques aquello descrito en el diagrama de flujo anterior. Algunos bloques forman funciones de código con más bloques en su interior. Para ver con más detalle el diagrama de bloques, en el *Anexo* de este documento se puede ver el diagrama más ampliado. En el caso del panel frontal, esta es la plataforma de interacción del usuario con el código y la interfaz donde introducir los valores de entrada internos y poder observar los valores y gráficas de las salidas internas.

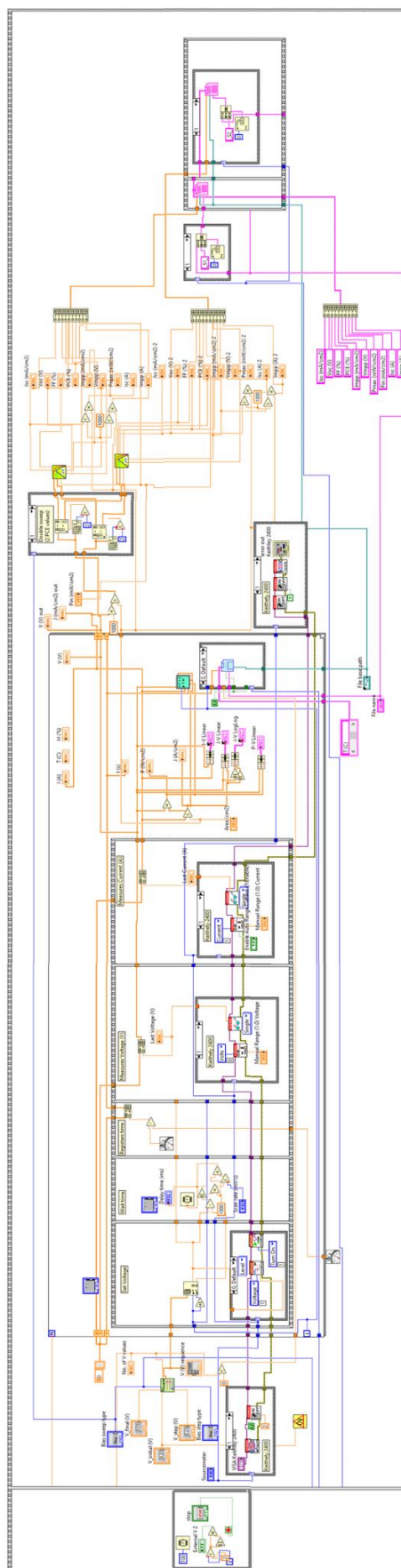


Figura 18. Diagrama de bloques de la lógica de la programación J-V en LabVIEW.

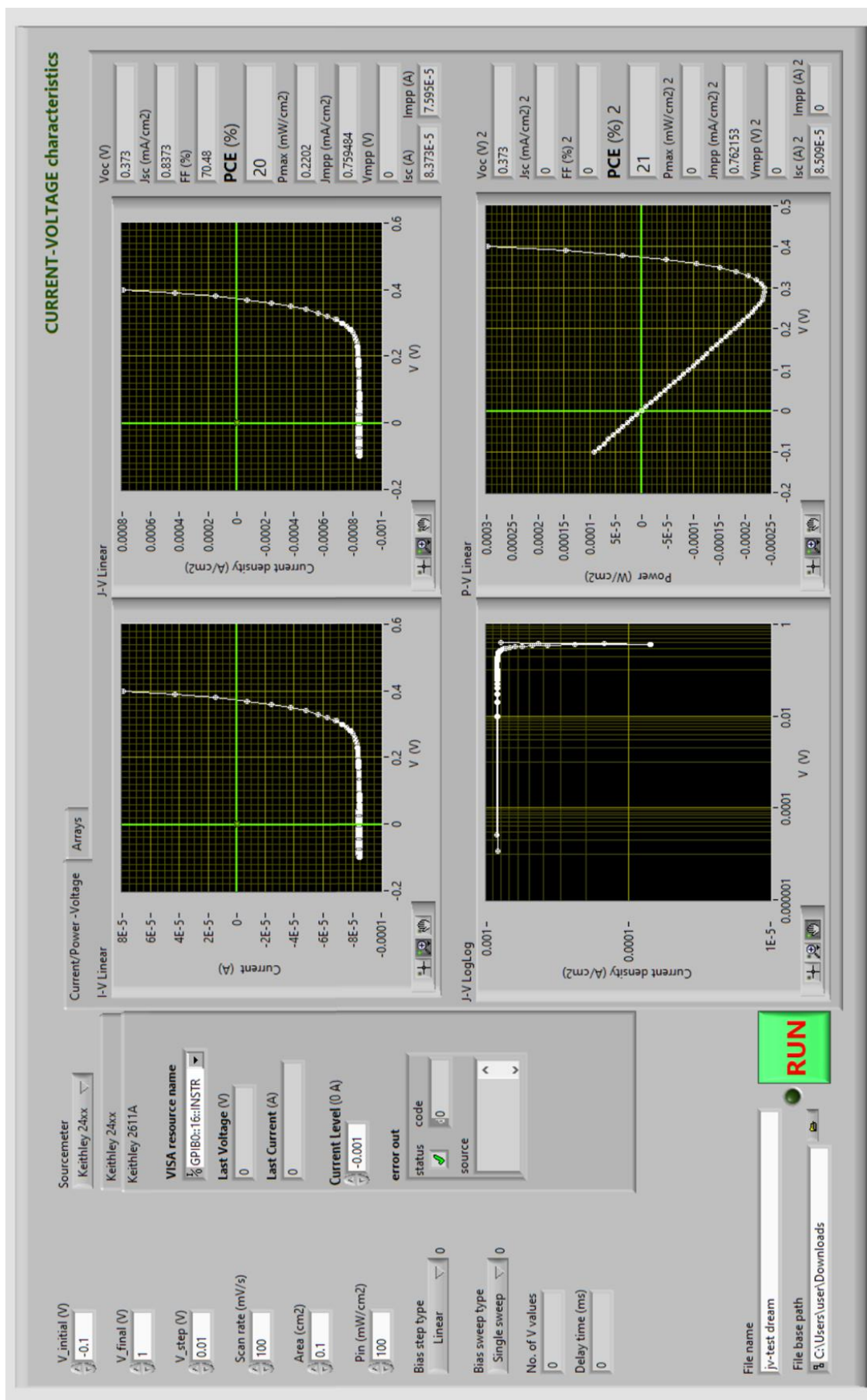


Figura 19. Panel frontal de la programación J-V en LabVIEW.

3. Resultados y discusión

3.1. Implementación Arduino

3.1.1. Kit Arduino UNO

El kit de microcontrolador escogido para la creación del equipo de testeo es el Arduino UNO, el cual contiene el microcontrolador ATmega328P. Este microcontrolador es un circuito integrado de la familia AVR de 8 bits y de arquitectura RISC. Algunas de las características más importantes del ATmega328P son: 32 kB de memoria flash programable, 1 kB de memoria EEPROM, 2 kB de memoria SRAM, 32 pines, 23 líneas de entrada/salidas generales, 32 registros de uso general, 3 temporizadores/contadores, 26 vectores de interrupciones internas y externas, comunicaciones de tipo USART, I2C i SPI, ADC con 8 canales de 10 bits y 5 modos de bajo consumo (Arduino, 2024b).

Muchas de las características mencionadas en el párrafo anterior no serán utilizadas en este proyecto, pero dan cabida a futuras ampliaciones o posibles funcionalidades adyacentes para el equipo de testeo. A continuación, se muestra un diagrama con los distintos pines de entrada/salida del dispositivo Arduino UNO:

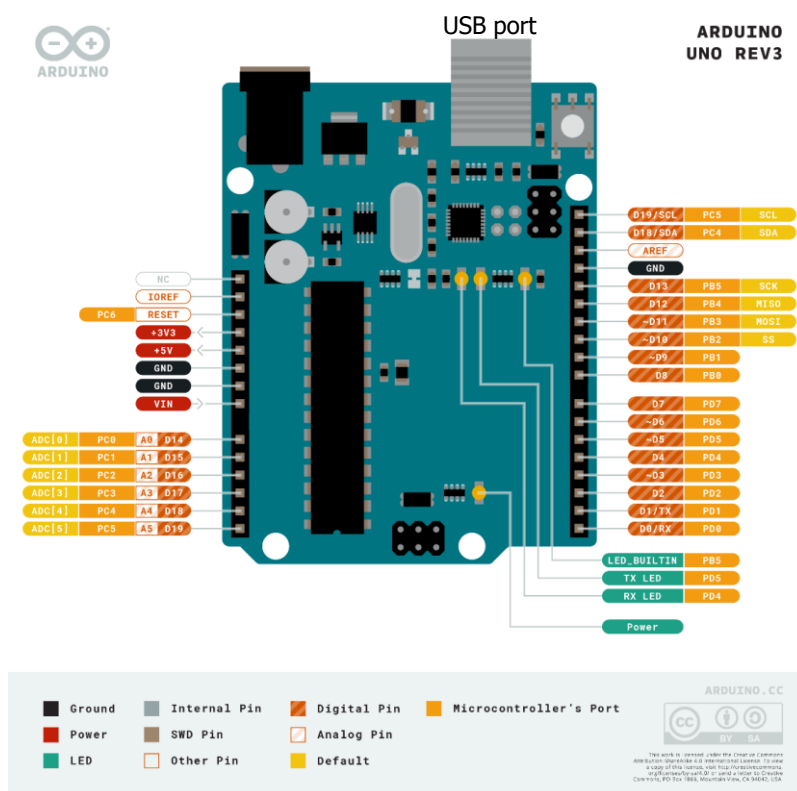


Figura 20. Diagrama de pines del kit Arduino UNO (Arduino, 2024b).

La elección de este microcontrolador del fabricante Arduino se ha realizado siguiendo criterios de coste y número de pines I/O del microcontrolador y el ADC (Convertidor Analógico-Digital). Como se muestra en la figura anterior, el kit dispone de 6 pines para entradas analógicas (A0-A5) y, por tanto, posibles canales de entrada para el ADC. Estos pines permitirán la entrada de la lectura de los voltajes de las celdas solares. Este kit está alimentado

a 5 V a través de un cable USB conectado a un PC, un adaptador AC-DC o una batería. El microcontrolador se programa en lenguaje C/C++ a través del entorno de programación Arduino Software IDE.

Algunos puntos importantes a la hora de usar la funcionalidad de convertidor analógico-digital (ADC) del kit Arduino UNO son el voltaje de referencia, la resolución del convertidor, la precisión en la lectura y el tiempo de conversión. Los tres primeros puntos son interdependientes, pues cuanto mayores son el voltaje de referencia y la resolución, mayor será la precisión en la lectura y a la inversa.

El voltaje de referencia para la ADC puede venir del propio microcontrolador o ser conectado a este de forma externa. Los voltajes internos pueden ser 5V (la alimentación del microcontrolador), 3.3V o 1.1V y el voltaje externo es aquel conectado al pin AREF. Este voltaje de referencia fija el máximo voltaje que puede medir el equipo. Si se diera el caso de sobrepasar este valor, la lectura sería siempre la máxima permitida por la resolución. La resolución del ADC del microcontrolador del kit Arduino UNO es de 10 bits, lo que permite conversiones a valores digitales entre 0x000 y 0x3FF, o lo que viene siendo lo mismo, entre 0 y 1023. El tiempo de conversión es de 13 ciclos de reloj ADC y, sabiendo que la frecuencia del reloj ADC por defecto es de 1MHz, se calcula a continuación el tiempo de una conversión:

$$t_{conv.} = 13 \cdot \frac{1}{1MHz} = 13 \cdot 1 \cdot 10^{-6} s = 13 \cdot 10^{-6} s = 13 \mu s \quad \text{Ecuación 28}$$

Uno de los requisitos planteados al inicio del proyecto, al tratarse de un proyecto enfocado a la investigación, era conocer la precisión en las medidas de voltaje con Arduino y que ésta fuera lo más alta posible, conociendo las posibles limitaciones del microcontrolador. Por ello, sabiendo que la resolución queda fijada por el ADC y que el voltaje de referencia escogido es el interno de menor magnitud (1.1 V), el cálculo de la precisión en la lectura queda definido en la siguiente ecuación:

$$Precisión = \frac{1.1 V}{1024} = 1.1 mV \quad \text{Ecuación 29}$$

Se ha podido escoger el voltaje de referencia de 1.1 V debido a que sabemos que el voltaje estudiado en las celdas solares nunca superará este valor. En caso de superarlo, la lectura nos daría un valor de 1.1 V. La lectura final quedará definida por la ecuación siguiente, la cual se ha implementado en el código de programación para conocer el voltaje de entrada:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{1.1 V} \quad \text{Ecuación 30}$$

En cuanto al desempeño del Arduino en la toma de medidas junto con el software LabVIEW, se han detectado unas desventajas de demora de actualización y baja precisión con respecto a los equipos de mediciones que hay en el mercado. Aun así, teniendo en cuenta el bajo presupuesto que supone su implementación, este presenta un desempeño aceptable.

3.1.2. Sensor DHT22 (AM2302)

El sensor de temperatura y humedad DHT22 (también conocido como AM2302, e ilustrado en la *Figura 21*) permite obtener, a través de una única señal de salida digital, los valores de estas dos variables ambientales. Este cuenta con un microcontrolador de 8 bits, un elemento resistivo y un sensor de medida de humedad (sensor de humedad capacitivo de polímero). Los rangos de valores de las variables son de -40 a 80°C (precisión de ± 0.5 °C y resolución de 0.1°C) para el caso de la temperatura y de 0 a 100% de humedad relativa (precisión de $\pm 2\%$ y resolución de 0.1% RH). El sensor DHT22 se alimenta a 5 V y el tiempo de medición es de 2 segundos (Liu, s. f.).

Para la comunicación entre el sensor DHT22 (AM2302) y el kit de Arduino UNO se precisan 3 conexiones para la señal de DATA, alimentación y común. Además, el entorno de programación Arduino IDE cuenta con la librería "DHT.h" que facilita la programación de la comunicación con las funciones siguientes:

- `begin()`: Empieza la comunicación entre el microcontrolador del sensor y el del Arduino UNO.
- `readTemperature()`: Lee la temperatura en grados Celsius.
- `readHumidity()`: Lee la humedad relativa en porcentaje.

La humedad relativa se obtiene a partir de la variación en la resistencia entre dos electrodos situados en la superficie de un sustrato dieléctrico de polímero que absorbe vapor de agua. Los cambios en la humedad relativa afectan la constante dieléctrica del sustrato, que causa una variación en el valor de su capacitancia eléctrica y en la resistencia entre sus electrodos. La resistencia entre los electrodos es proporcional a la humedad relativa del aire, siendo menor con más humedad y mayor con menor humedad. La temperatura se obtiene a partir de un termistor NTC, una resistencia de coeficiente de temperatura negativo que disminuye su valor a medida que aumenta la temperatura en el aire que la rodea (Sensores e Instrumentación Guemisa S.L., s. f.).



Figura 21. Sensor DHT22 (AM2302) (RS, s. f.).

3.1.3. Monitor (Display) de 4 dígitos de 7 segmentos

El monitor (display, por su nombre en inglés) de 4 dígitos de 7 segmentos es un dispositivo que permite la muestra de datos al usuario. Cuenta con 4 dígitos con 7 LEDs direccionables individualmente (ver *Figura 22*) de forma que configuran dígitos según su iluminación. Los dígitos van numerados según su posición de izquierda a derecha, de 0 a 3. Además, cuenta con dos puntos entre el dígito 1 y el 2, permitiendo simular un reloj digital con la separación entre las horas y los minutos. El display 3642BH se alimenta a 5 V y la señal de reloj CLK no está vinculada a la del microcontrolador.



Figura 22. Display de 4 dígitos de 7 segmentos 3642BH.

Los segmentos van numerados (1-7) según el bit que los activa, aunque se suelen etiquetar con letras (a-g). En un valor binario, el bit que enciende cada segmento es: 0b0gfedcba. A continuación, en la *Figura 23* se muestra una imagen con la designación de cada segmento y la disposición de LEDs encendidos para mostrar los números del '0' al '9':

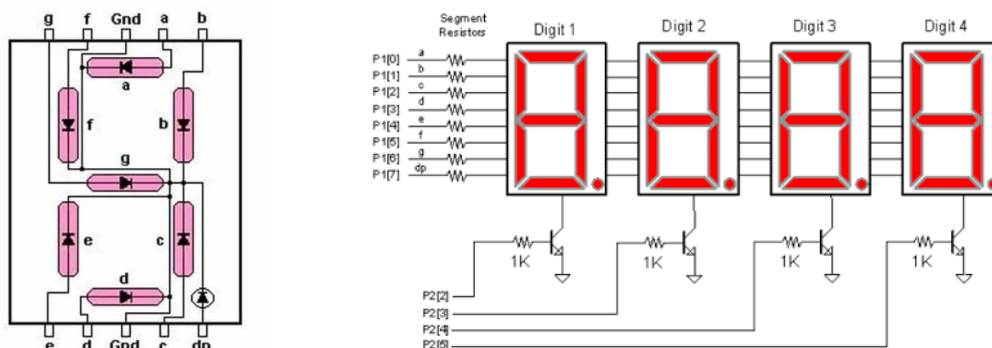


Figura 23. Etiquetaje y funcionamiento de encendido de los segmentos del display.

Como se puede observar en las dos imágenes anteriores (*Figura 22* y *Figura 23*), el encendido de los distintos segmentos tiene la misma señal de común. La designación de qué dígito se enciende se consigue poniendo a 0 o no esta señal de común en cada dígito.

Los registros que controla el encendido de los diferentes segmentos son accesibles a través del circuito integrado TM1637. Para la comunicación con este circuito integrado se usa un bus de dos cables (CLK, señal de reloj, y DIO, señal de datos).

Para la comunicación entre el display 3642BH y el kit de Arduino UNO se precisan 4 conexiones para las señales de CLK, DIO, alimentación y común. Además, el entorno de programación Arduino IDE cuenta con la librería "TM1637Display.h" que facilita la programación de la comunicación con las funciones siguientes:

- setSegments(): Establece los segmentos encendidos de un dígito designado.
- showNumberDec(): Muestra un número decimal en un dígito designado.
- setBrightness(): Establece la intensidad en el brillo de la pantalla (0-7).
- clear(): Apaga todos los LEDs del display.

3.1.4. Protección (Shield) de conexión de bornas

Para la conexión entre las celdas solares y el kit Arduino UNO hace falta el uso de una estructura de protección (shield por su denominación en inglés) de conexión, donde se puedan interconectar las bornas tipo banana con los pines Arduino. Inicialmente se planteó con la conexión de 3 pares de bananas (3 x (señal + común)) pero, sabiendo que las celdas solares suministradas por el departamento de la URV cuentan con 4 píxeles y que el común de todos ellos es el mismo, se decidió dejar la shield con 4 bornas para señales y 2 para conectar los comunes.

La base de la shield es una placa de soldaduras con las mismas dimensiones que el kit Arduino UNO. En esta placa de soldaduras se han realizado 6 taladros pasantes para roscar en ellos 6 conectores tipo banana (4 rojos y 2 negros). A estos conectores tipo banana se les ha soldado cables para Arduino de calibre 28 AWG. Entre el cable de cada señal y del común se han soldado condensadores de desacoplo de 100 nF para filtrar las variaciones de frecuencias altas y quedarnos únicamente con las variaciones importantes en los valores de voltaje. Además, en los cables que salían de la placa y debían conectarse al kit Arduino UNO,

se mantuvo el conector tipo macho que permite su conexión a los conectores hembra de Arduino de 2,54 mm. En la *Figura 24* se pueden ver fotografías de la cara superior e inferior de la shield de conexiones, resaltando en ellas la utilidad de cada conector banana y la ubicación de los condensadores de desacoplo.

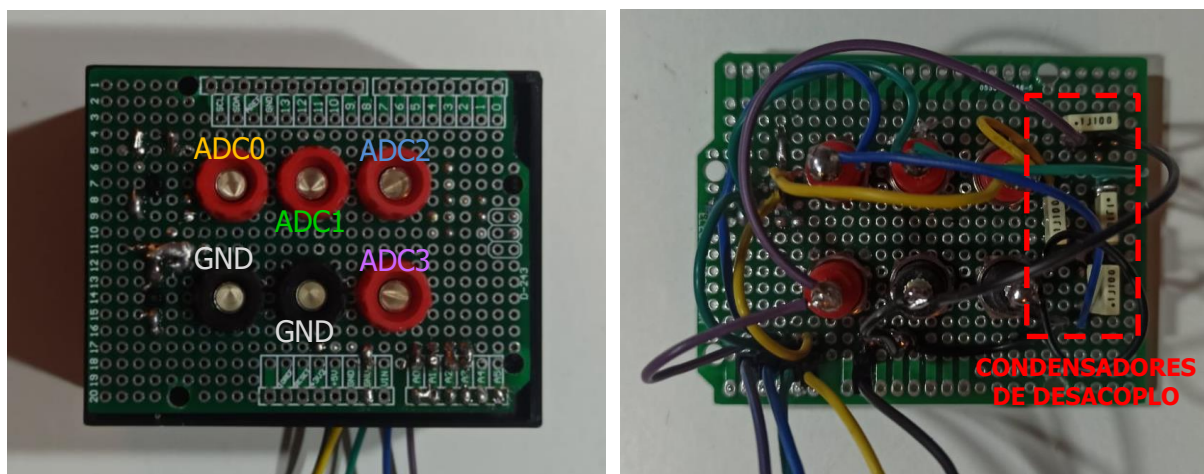


Figura 24. Shield de conexiones de bornas (a) cara superior y (b) cara inferior.

Para la conexión del sensor DHT22 y del display de 4 dígitos de 7 segmentos no hizo falta soldarlos a la shield de conexiones, por lo que con cables de Arduino hembra-macho hubo suficiente. En la *Figura 25* se muestra un diagrama eléctrico con todos los dispositivos conectados al kit Arduino UNO.

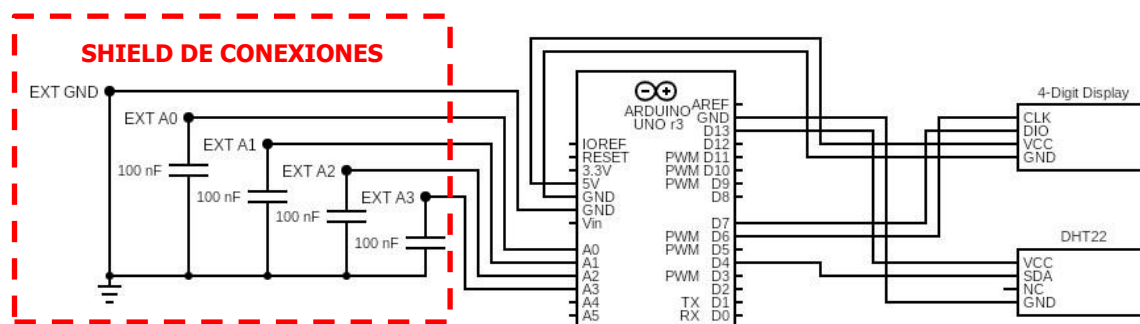


Figura 25. Diagrama eléctrico entre los dispositivos externos y el kit Arduino UNO, elaborado con la herramienta virtual circuit-diagram.org.

3.1.5. Estructura modular de protección

Para el diseño de la estructura de protección y soporte del kit Arduino UNO y la shield de conexión de bornas se realizó un diseño con la herramienta digital tinkercad.com (ver *Figura 26*). El diseño cuenta con dos módulos encajables uno encima del otro.

El módulo inferior contiene y protege el kit Arduino, cuenta con orificios circulares en las paredes laterales para la ventilación del kit, con dos orificios de mayor dimensión para la conexión del cable de alimentación al puerto USB-B del kit o la conexión del voltaje de entrada externo. Además, también cuenta con una pestaña de sujeción en un lateral por si se quisiese fijar la estructura verticalmente.

El módulo superior permite el montaje en su superficie de la shield de conexiones, cuenta con agujeros pasantes para atornillar la shield, con orificios para ventilación y salida de cableado y con agujero rectangular para la sujeción del display de 4 dígitos de 7 segmentos en un lateral, permitiendo el visionado de valores por parte del usuario. En la mayoría de los agujeros se optó por figuras redondeadas para evitar gastar material de impresión en el uso de soportes, aunque para el caso del agujero del display no hubo alternativa. El resultado final, después de la impresión 3D y montaje de la placa Arduino, el display y el shield de conexiones, se presenta en la *Figura 27*.

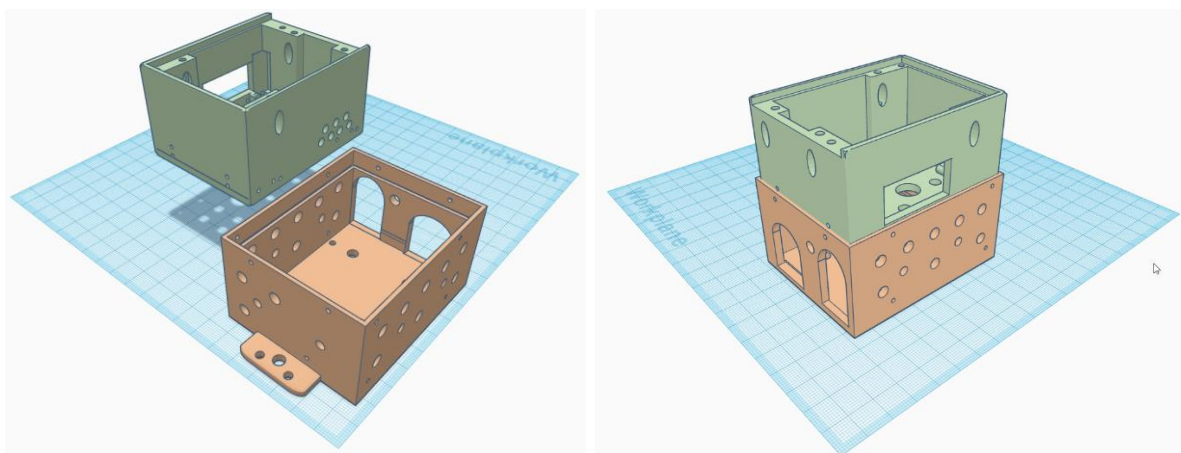


Figura 26. Diseño dimensional de la estructura modular para el soporte y protección del kit Arduino UNO y la shield de conexiones, elaborado con la herramienta virtual tinkercad.com.

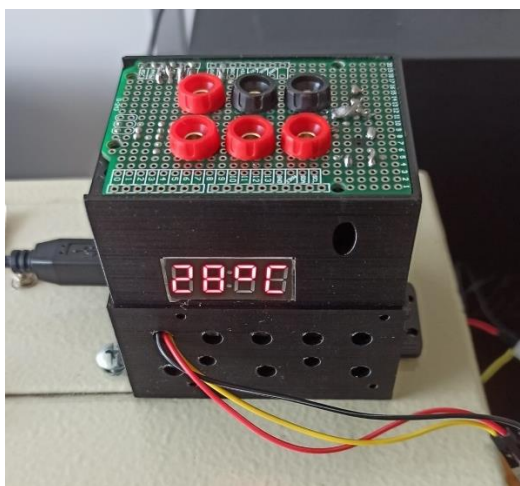


Figura 27. Estructura modular con el montaje de la shield, el kit Arduino UNO, el sensor DHT22 y el display de 4 dígitos de 7 segmentos.

3.1.6. Código de programación en el kit Arduino UNO

El código usado para la programación del microcontrolador del kit Arduino UNO con el fin de configurar la toma de datos de voltajes de las celdas solares, la recepción de datos del sensor DHT22 y el muestreo de las variables de temperatura y humedad por el display de 4 dígitos de 7 segmentos se ha elaborado a partir de modificaciones de los códigos de referencia (Arduino, 2024a), (Bakker, 2019a), (Bakker, 2019b) y (Cheich, 2021), a través del entorno de programación Arduino Software IDE con el lenguaje C/C++.

El código cuenta con unas líneas al principio de declaración de librerías, declaración e inicialización de variables globales y configuración de comunicaciones. Después se establecen configuraciones previas al código de bucle y en las líneas del bucle, las cuales se ejecutarán de forma repetida hasta que se pare la ejecución del código, se realizan la lectura de voltajes analógicos, lectura de valores de temperatura y humedad relativa, y escritura de todos estos valores como caracteres por el puerto serie de comunicación con el PC y escritura en el display.

La comunicación entre del kit Arduino UNO y el software de LabVIEW se establece a través del puerto serie entre el microcontrolador del kit y el PC del laboratorio. Es por ello por lo que aquellos valores que se desean comunicar entre uno y otro deben ser convertidos a caracteres y escritos en el puerto serie. Más adelante se detalla la recepción y tratamiento de la cadena de caracteres en el software LabVIEW.

A continuación, se enumeran los distintos apartados del código, ordenados según aparición en las líneas de código:

- Declaración de librerías de funciones
- Definición de la nomenclatura para los pines de conexión con el display/sensor
- Declaración e inicialización de variables globales
- Configuración de la comunicación con el display y el sensor DHT22
- Configuración inicial previa a los bucles de código
 - Definición del voltaje de referencia del ADC como interno
 - Inicio de la comunicación con el puerto serie
 - Definición de los pines como entrada/salida
 - Configuración del display
 - Inicio comunicación con el sensor DHT22
 - Definición de la referencia inicial de tiempo y fecha
- Código que se repite en bucle
 - Lectura del valor analógico de voltaje en las entradas analógicas
 - Conversión de los valores de voltaje
 - Transformación de los voltajes de números a caracteres
 - Escritura de la fecha por puerto serie
 - Escritura de los voltajes en caracteres por puerto serie
 - Lectura de los valores de temperatura y humedad del sensor DHT22
 - Escritura de temperatura y humedad por puerto serie
 - Escritura de temperatura y humedad por el display

Seguidamente se presentan las líneas del código, donde se han añadido comentarios en todas ellas para detallar su función:

```
//Declaración de librerías de funciones:
#include "TM1637Display.h" //Librería del display de 4 dígitos de 7 segmentos.
#include "DHT.h" //Librería del sensor de temperatura y humedad DHT.
#include "TimeLib.h" //Librería para el tratamiento de fechas y tiempos.

//Definición de la nomenclatura para los pines de conexión con el display/sensor:
#define DHTPIN 4 //Definición del pin donde se comunicarán los datos del sensor DHT22.
#define DHTTYPE DHT22 //Definición del tipo de sensor DHT a DHT22_AM2302.
#define CLK 5 //Definición del pin que comunicará la señal de reloj del display.
#define DIO 6 //Definición del pin que comunicará la señal de datos del display.

//Declaración e inicialización de variables globales:
float voltageReference = 1.1; //Voltaje de referencia para la conversión ADC en 1.1V.
int temperature, humidity = 0; //Variables de temperatura y humedad con valores enteros,
inicializadas como 0.
```

```
char voltcharA0[6], voltcharA1[6], voltcharA2[6], voltcharA3[6]; //Variables de voltaje con
valores en tabla de caracteres.
String voltcharAnalog[12]; //Variable de voltaje con valor en tabla de cadena de
caracteres.
const uint8_t celsius[] = { //Define la variable constante celsius que inicializa poniendo
a 1 los bits de los segmentos que se encenderán para representar esa unidad en el display.
    SEG_A | SEG_B | SEG_F | SEG_G, //Símbolo grados.
    SEG_A | SEG_D | SEG_E | SEG_F //Letra C de Celsius.
};
const uint8_t hum[] = { //Define la variable constante hum que inicializa poniendo a 1 los
bits de los segmentos que se encenderán para representar esa letra en el display.
    SEG_B | SEG_C | SEG_E | SEG_F | SEG_G //Letra H.
};

//Configuración de la comunicación con el display y el sensor DHT22:
TM1637Display display = TM1637Display(CLK, DIO); //Crea el objeto display del tipo
TM1637Display, enviando la dirección de los pines donde se conecta la señal de reloj y la
salida de datos al display.
DHT dht = DHT(DHTPIN, DHTTYPE); //Crea el objeto dht del tipo DHT, enviando la dirección
del pin donde se conecta la señal de datos procedente del sensor y el tipo de sensor al que
se conecta.

//Configuración inicial previa a los bucles de código:
void setup() { //Código que se ejecuta únicamente al empezar la ejecución del código.

    //Definición del voltaje de referencia del ADC como interno:
    analogReference(INTERNAL); //Voltaje de referencia para la conversión ADC en 1.1V

    //Inicio de la comunicación con el puerto serie:
    Serial.begin(9600); //Define la velocidad de transmisión de valores por la
comunicación del puerto serie y empieza esta comunicación.

    //Definición de los pines como entrada/salida:
    pinMode(A0,INPUT); //Pin A0 definido como entrada.
    pinMode(A1,INPUT); //Pin A1 definido como entrada.
    pinMode(A2,INPUT); //Pin A2 definido como entrada.
    pinMode(A3,INPUT); //Pin A3 definido como entrada.
    pinMode(A4,INPUT); //Pin A4 definido como entrada.
    pinMode(A5,INPUT); //Pin A5 definido como entrada.
    pinMode(13,OUTPUT); //Pin D13 definido como salida.
    digitalWrite(13, HIGH); //Se activa pin D13, poniendo esta salida a 5 V para usarla
como alimentación del sensor DHT22, pues no se dispone de más pines para alimentar.

    //Configuración del display:
    display.clear(); //Limpia el display para que empiece con todos los LEDs apagados.
    display.setBrightness(7); //Define la intensidad de iluminación del display al
máximo.

    //Inicio comunicación con el sensor DHT22:
    dht.begin(); //Empieza la comunicación con el sensor de temperatura y humedad.

    //Definición la referencia inicial de tiempo y fecha:
    setTime(17, 00, 0, 12, 8, 2024); //El usuario define el tiempo y fecha en que
quedará registrado que se empieza a ejecutar el código y sobre esta referencia irá
pasando el tiempo.
}
```

```
//Código que se repite en bucle:
void loop() { //Dentro de los { } se encuentra el código que se repite dentro del bucle.

    //Lectura del valor analógico de voltaje en las entradas analógicas:
    int sensorValueA0 = analogRead(A0); //Lee el valor analógico de voltaje en pin A0.
    int sensorValueA1 = analogRead(A1); //Lee el valor analógico de voltaje en pin A1.
    int sensorValueA2 = analogRead(A2); //Lee el valor analógico de voltaje en pin A2.
    int sensorValueA3 = analogRead(A3); //Lee el valor analógico de voltaje en pin A3.

    //Conversión de los valores de voltaje:
    float voltageA0 = sensorValueA0 * (voltageReference / 1023.0); //Convierte el
    resultado del ADC de 0-1023 a un valor real de tensión sensada (0-1.1 V).
    float voltageA1 = sensorValueA1 * (voltageReference / 1023.0); //Convierte el
    resultado del ADC de 0-1023 a un valor real de tensión sensada (0-1.1 V).
    float voltageA2 = sensorValueA2 * (voltageReference / 1023.0); //Convierte el
    resultado del ADC de 0-1023 a un valor real de tensión sensada (0-1.1 V).
    float voltageA3 = sensorValueA3 * (voltageReference / 1023.0); //Convierte el
    resultado del ADC de 0-1023 a un valor real de tensión sensada (0-1.1 V).

    //Transformación de los voltajes de números a caracteres:
    dtostrf(voltageA0, -6, 4, voltcharA0); //Transforma número de float en caracteres.
    voltcharAnalog[0] = voltcharA0; //Escribe los caracteres en la casilla
    correspondiente de la tabla de voltajes en caracteres.
    dtostrf(voltageA1, -6, 4, voltcharA1); //Transforma número de float en caracteres.
    voltcharAnalog[1] = voltcharA1; //Escribe los caracteres en la casilla
    correspondiente de la tabla de voltajes en caracteres.
    dtostrf(voltageA2, -6, 4, voltcharA2); //Transforma número de float en caracteres.
    voltcharAnalog[2] = voltcharA2; //Escribe los caracteres en la casilla
    correspondiente de la tabla de voltajes en caracteres.
    dtostrf(voltageA3, -6, 4, voltcharA3); //Transforma número de float en caracteres.
    voltcharAnalog[3] = voltcharA3; //Escribe los caracteres en la casilla
    correspondiente de la tabla de voltajes en caracteres.

    //Escritura de la fecha por puerto serie:
    Serial.print("Hora:"); //Escribir por puerto serie el tiempo.
    if (hour()<10){
        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        hora es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de hora.
    }
    Serial.print(hour()); //Escribir por puerto serie la hora.
    Serial.print(":"); //Escribir por puerto serie símbolo :.
    if (minute()<10){
        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        minuto es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de minuto.
    }
    Serial.print(minute()); //Escribir por puerto serie el minuto.
    Serial.print(":"); //Escribir por puerto serie símbolo :.
    if (second()<10){
        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        segundo es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de segundo.
    }
    Serial.print(second()); //Escribir por puerto serie el segundo.
    Serial.print("...");
    if (day()<10){
```

```

        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        día es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de día.
    }
    Serial.print(day()); //Escribir por puerto serie el segundo.
    Serial.print("/"); //Escribir por puerto serie símbolo /.
    if (month(<10){
        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        mes es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de mes.
    }
    Serial.print(month()); //Escribir por puerto serie el segundo.
    Serial.print("/"); //Escribir por puerto serie símbolo /.
    Serial.print(year()); //Escribir por puerto serie el segundo.

    //Escritura de los voltajes en caracteres por puerto serie:
    Serial.print("...ADC0: "); //Escribir por puerto serie "...ADC0: ".
    Serial.print(voltcharAnalog[0]); //Escribir por puerto serie el voltaje ADC0.
    Serial.print("...ADC1: "); //Escribir por puerto serie "...ADC1: ".
    Serial.print(voltcharAnalog[1]); //Escribir por puerto serie el voltaje ADC1.
    Serial.print("...ADC2: "); //Escribir por puerto serie "...ADC2: ".
    Serial.print(voltcharAnalog[2]); //Escribir por puerto serie el voltaje ADC2.
    Serial.print("...ADC3: "); //Escribir por puerto serie "...ADC3: ".
    Serial.print(voltcharAnalog[3]); //Escribir por puerto serie el voltaje ADC3.

    //Lectura de los valores de temperatura y humedad del sensor DHT22:
    temperature = dht.readTemperature(); //Lectura de la temperatura en °C del sensor.
    humidity = dht.readHumidity(); //Lectura de la humedad en % del sensor.

    //Escritura de temperatura y humedad por puerto serie:
    Serial.print("...TEMP: "); //Escribir por puerto serie "...TEMP: ".
    if (temperature<10){
        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        temperatura es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de temperatura.
    }
    Serial.print(temperature); //Escribir por puerto serie la temperatura.
    Serial.print("...HUMI: "); //Escribir por puerto serie "...HUMI: ".
    if (humidity<10){
        Serial.print("0"); //Para mantener el formato de dos dígitos si el valor de
        humedad es inferior a 10, se escribe un 0 delante del valor de humedad.
    }
    Serial.println(humidity); //Escribir por puerto serie la humedad relativa.

    //Escritura de temperatura y humedad por el display:
    display.showNumberDec(temperature, false, 2, 0); //Escritura del valor de la
    temperatura en el display.
    display.setSegments(celsius, 2, 2); //Escritura del símbolo de °C en el display.
    delay(1000); //Espera de 1s.
    display.clear(); //Limpieza del display.
    display.showNumberDec(humidity, false, 3, 1); //Escritura del valor de la humedad en
    el display.
    display.setSegments(hum, 1, 0); //Escritura de la letra H de humedad en el display.
    delay(1000); //Espera de 1s.
    display.clear(); //Limpieza del display.
}

```

Figura 28. Código de programación del microcontrolador del kit Arduino UNO.

3.1.7. Interfaz entre el kit Arduino UNO y el software LabVIEW

Como se dijo anteriormente, la comunicación entre el kit Arduino UNO y el software de LabVIEW se establece a través del puerto serie entre el microcontrolador del kit y el PC del laboratorio. Así pues, el software de LabVIEW debe leer la comunicación en este puerto. Por ello, hace falta que se especifique el puerto en el que está conectado el Arduino al PC y la configuración de comunicación entre estos dos elementos, como es el caso de la velocidad de transmisión de 9600 bits/s.

Dentro del diagrama de bloques en la programación de LabVIEW (ver *Figura 29*), estos datos de configuración en la comunicación son indicados al módulo de VISA Configure Serial Port, quien se encarga de inicializar la comunicación. Posteriormente el puerto de comunicación y la señal que indica de posibles errores de comunicación son pasadas al módulo de Property Node, quien se encarga de obtener los bytes de información en el puerto indicado. Estos bytes de información, junto con el puerto y la señal de error son enviados al módulo VISA Read, donde los bytes de información se transforman en caracteres, leíbles por el usuario en el Buffer Arduino del Panel Frontal. Si lo que se desea es romper esta cadena de caracteres en distintos valores de información, como pueden ser los valores de voltaje analógico, la temperatura o la humedad, esta cadena de caracteres precisa un tratamiento. Este tratamiento es el que ofrece el módulo de String Subset, quien recibe la cadena de caracteres completa, los caracteres iniciales que desea eliminar y aquellos que se quiere quedar, para cortar la cadena y quedarse con una secuencia concreta de caracteres. Esta cadena concreta de caracteres pasa por el módulo String to Number para convertir los caracteres a números decimales, para poderlos graficar. Por último, se precisa el módulo VISA Close, para finalizar la comunicación y no tener problemas al iniciarla de nuevo posteriormente.

Esta parte del diagrama de bloques de LabVIEW se presenta simplificada en este apartado, pues solo sería una parte pequeña del diagrama de bloques de Labview que permitiría la obtención de valores en el seguimiento de MPP.

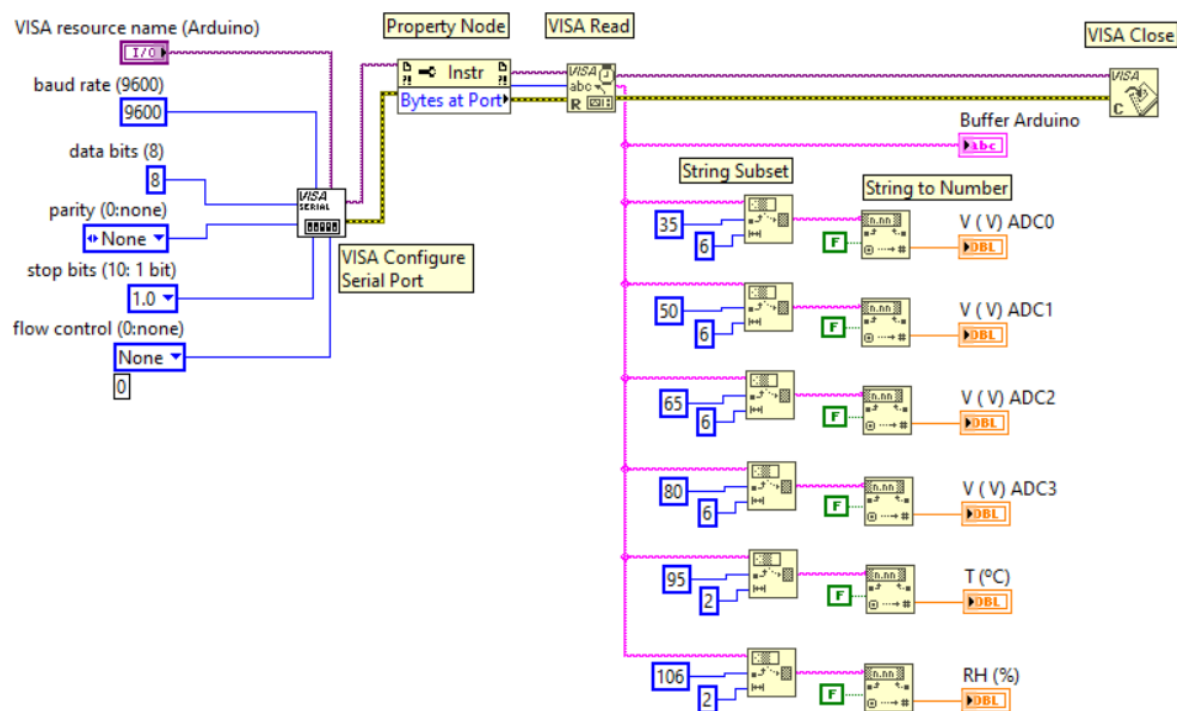


Figura 29. Diagrama de bloques de la comunicación entre el kit Arduino UNO y el software de LabVIEW.

3.2. Mediciones experimentales

Para elaborar los resultados de este proyecto se han realizado 2 medidas distintas: curvas J-V y seguimiento del punto de máxima potencia (MPP). Los procedimientos seguidos para la toma de estas medidas han sido detallados en apartados anteriores. Estas mediciones han sido tomadas en los dos tipos de muestras: OSCs y PSVs. Después de tomar medidas en varias muestras de ambos tipos, se han seleccionado 7 muestras con resultados más estables y menor cantidad de irregularidades en la toma de valores. En la *Tabla 5* se enumera para las distintas muestras la referencia interna y del fabricante para cada sustrato, el tipo de celda solar y las mediciones que se tomaron: testeo de estabilidad, analizando los parámetros eléctricos durante la degradación de las celdas para realizar un seguimiento del MPP, y diferentes iluminancias, analizando los parámetros eléctricos exponiendo las celdas a iluminancias entre 200 y 5000 lux.

Tabla 5. Detalle de las mediciones experimentales tomadas en las distintas muestras.

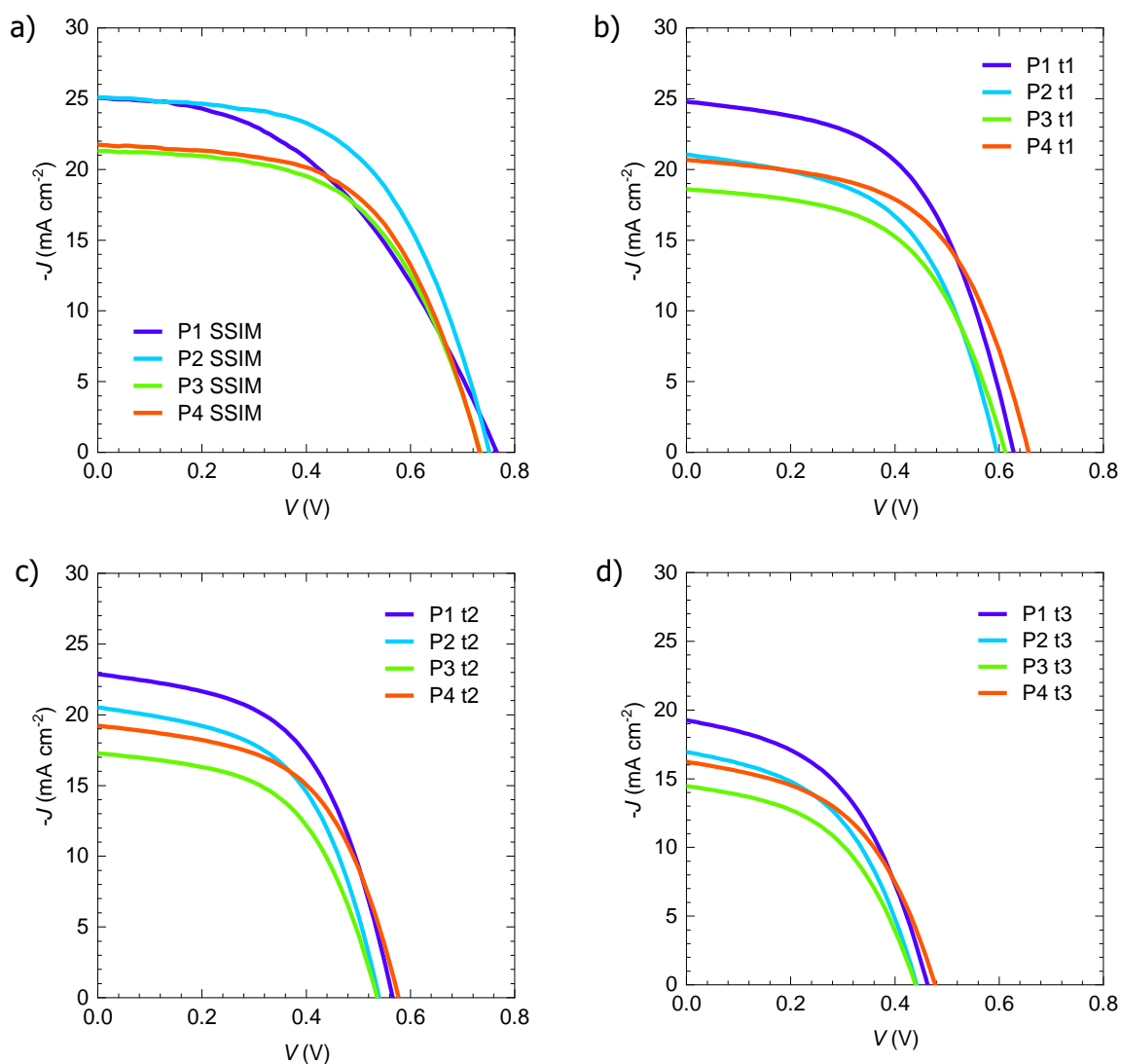
Ref. interna	Ref. sustrato fabricante	Tipo de celda solar	Mediciones experimentales	
			Testeo de estabilidad	Diferentes iluminancias
OSC1	V5	OSC	X	
OSC2	cA3		X	
OSC3	A10			X
PSC4	N12	PSC	X	
PSC5	c9		X	
PSC6	x1		X	
PSC7	c11			X

Entre los resultados presentados a continuación se encuentran curvas J-V con el simulador solar, curvas J-V con la lámpara en la cámara de degradación y gráficas R-V y m-V de dichas curvas de degradación. Además, se encuentran gráficas con el seguimiento de los valores de voltaje, corriente, densidad de corriente, potencia, factor de llenado y eficiencia de conversión de potencia, buscando el punto de máxima potencia durante la degradación de las celdas solares.

3.2.1. OSC1: testeo de estabilidad

La muestra OSC1 es una OSC con la referencia del fabricante V5. Para esta muestra se han realizado las mediciones para un testeo de estabilidad y así poder ver la evolución de la celda solar ante su degradación. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente, pero sin seguimiento de los valores de temperatura y humedad. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de la curva J-V entre píxeles de la celda solar a eficiencias distintas. Las medidas de la *Figura 30 a)* fueron tomadas en el simulador solar, correspondiente al 100% de su eficiencia y permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, y posteriormente las siguientes figuras muestran la curva J-V bajo iluminación constante en una lámpara dentro de la cámara de degradación a unas eficiencias de 95%, 80% y 50% para las *Figura 30 b), c), d)*, respectivamente. Posteriormente se han separado los píxeles en gráficas distintas para observar de forma individual como cambia su curva J-V durante la degradación en que va bajando su eficiencia. La *Figura 30 e)* corresponde al píxel 1, la *f)* al píxel 2, la *g)* al píxel 3 i la *h)* al píxel 4.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Los píxeles 1 y 2 son los que presentaban mejores características inicialmente, aunque se puede ver como el píxel 2 se degrada con mayor rapidez, llegando a asimilarse a las características del píxel 4. Esto se puede deber al hecho que el píxel 1 es siempre el que se encuentra cortocircuitado, a diferencia del resto que se encuentran en circuito abierto. Este factor hace que este píxel no se degrade con tanta rapidez. Por todo lo comentado, hay poca reproducibilidad de resultados entre los diferentes píxeles, por lo que las capas que componen el dispositivo podrían ser heterogéneas, no solo en espesores, sino en densidades de defectos y propiedades optoelectrónicas. Se observa en la degradación de esta celda una fuerte caída de J_{sc} . Motivo de ello es la pérdida en la absorción, además de un aumento en la recombinación, preferentemente no radiativa debido al decrecimiento de V_{oc} . Si fuera solo pérdida de absorción, el V_{oc} no disminuiría tanto, pues tiene una relación logarítmica con la concentración de portadores.



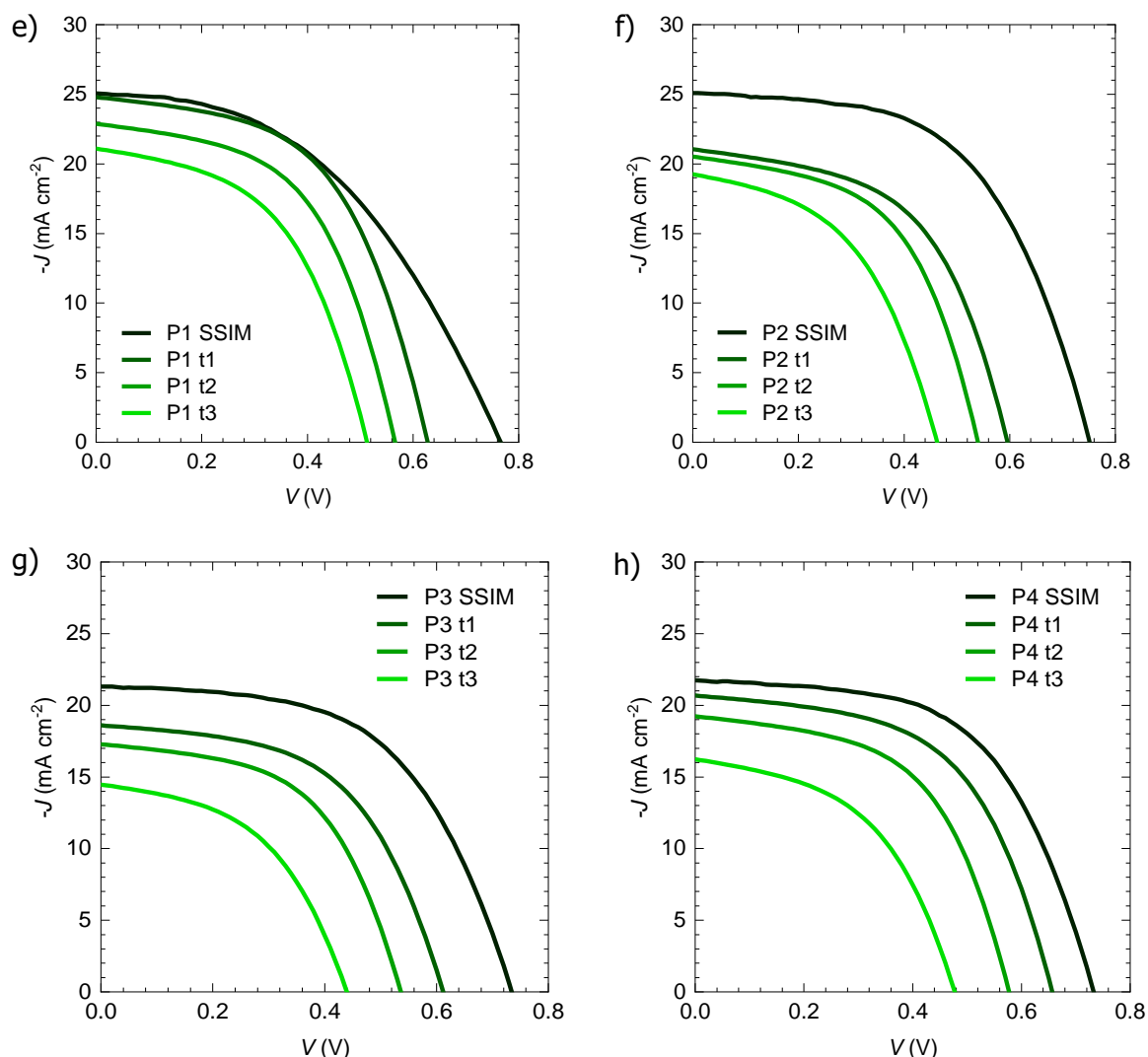


Figura 30. Comparativa de la curva J-V de los distintos píxeles de la muestra OSC1 a) a 100% de eficiencia (SSIM), b) a 95% de eficiencia, c) a 80% de eficiencia y d) a 50% de eficiencia y a distintos tiempos de degradación en e) píxel 1, f) píxel 2, g) píxel 3 y h) píxel 4.

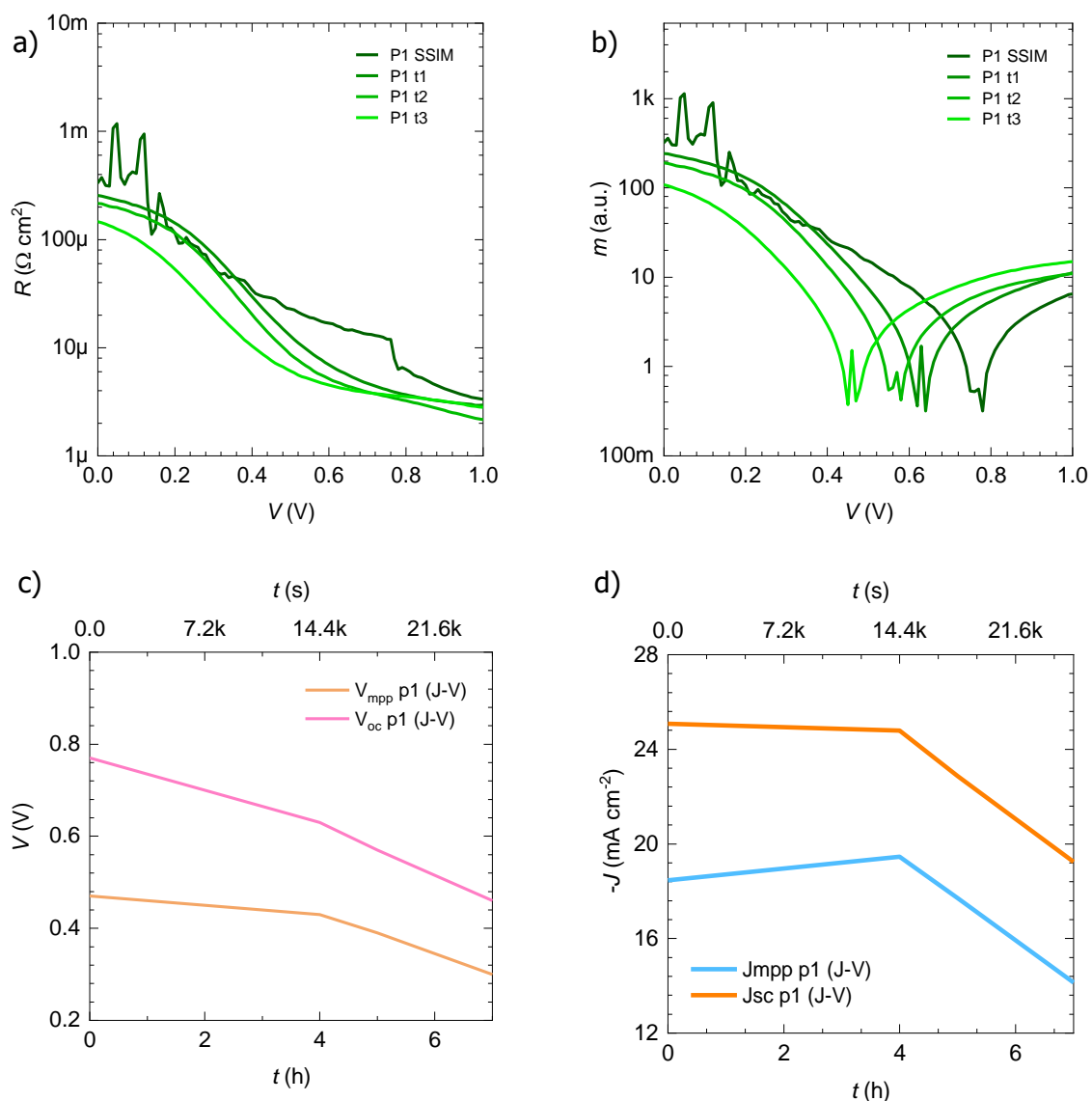
Las gráficas de la *Figura 31 a)* y *b)* muestran, respectivamente, las curvas R-V y m-V en el píxel 1, aquel que presentaba mejores características en el simulador solar, durante la degradación de la celda solar bajo una iluminancia de 1000 lux.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. En la evolución de la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la degradación, se ve cierta tendencia a empeorar estos factores a medida que se degrada la celda solar. Esto quiere decir reducir el valor de resistencia con voltajes cercanos a 0 y aumentar la resistencia con voltajes cercanos a V_{oc} . El factor de idealidad del diodo va moviendo su rango de valores entre 1 y 2 a voltajes menores.

Las siguientes gráficas de la *Figura 31 c)*, *d)*, *e)* y *f)* muestran la evolución de los distintos valores eléctricos a lo largo de la degradación. No se realizó seguimiento del MPP en esta muestra, los gráficos se han realizado a partir de las curvas J-V anteriores. Las medidas en *c)* muestran la evolución de los voltajes en el punto de máxima potencia y en circuito abierto, en *d)* la evolución de las densidades de corriente para el punto de máxima potencia y para

cortocircuito, en e) el factor de llenado y en f) la potencia en el punto de máxima potencia y eficiencia de conversión de potencia.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. El factor de llenado aumenta inicialmente, para después reducirse por debajo de su valor inicial. Lo mismo sucede con el valor de las densidades de corriente. Aunque para los valores de voltaje, estos siempre decrecen. Como cabía esperar, los voltajes en circuito abierto son siempre superiores al de punto de máxima potencia dentro del mismo píxel y lo mismo sucede entre la densidad de corriente en cortocircuito y la del punto de máxima potencia. La forma de los valores de potencia y PCE representados en la *Figura 31 f)* es la misma, pues la relación entre estos es la potencia incidente en la celda solar, y dado que este valor es constante, las formas de potencia generada y PCE son idénticas.



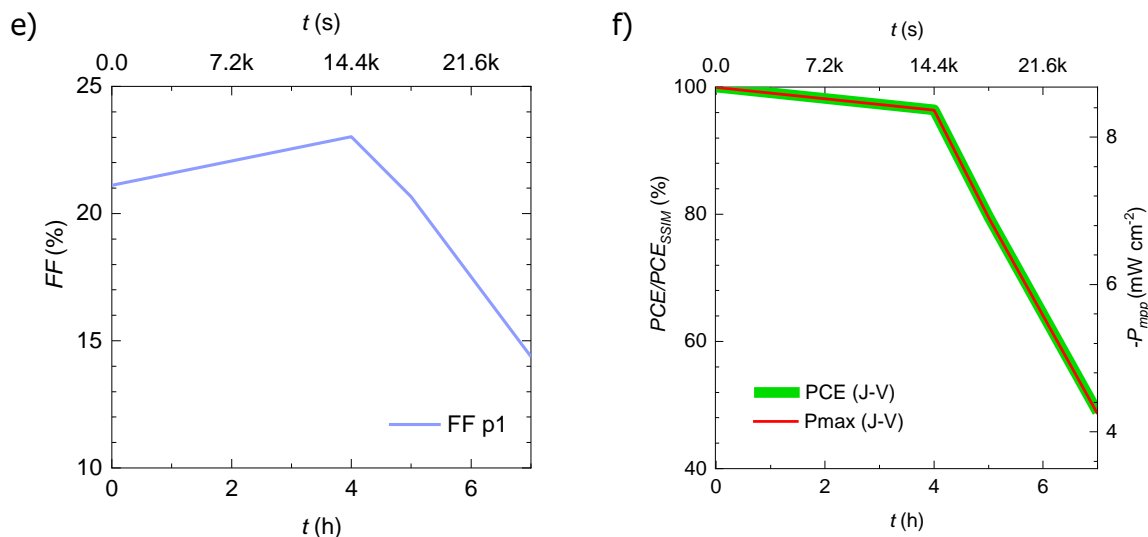


Figura 31. Evolución durante la degradación en el píxel 1 de la muestra OSC1 bajo iluminancia de 1000 lux de a) curva R-V, b) curva m-V, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) V_{mpp} y V_{oc} , e) FF y f) PCE y P_{mpp} .

3.2.2. OSC2: testeo de estabilidad

La muestra OSC2 es una OSC con la referencia del fabricante cA3. Para esta muestra se han realizado las mediciones para un testeo de estabilidad y así poder ver la evolución de la celda solar ante su degradación. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente, pudiendo ver el seguimiento de los valores de temperatura y humedad en la *Figura 33 d*. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de la curva J-V, R-V y m-V a lo largo de la degradación de la celda solar. Las medidas de la *Figura 32 a)* fueron tomadas en el simulador solar, permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, y posteriormente la *Figura 32 b), c) y d)* muestran, respectivamente, las curvas J-V, R-V y m-V en el píxel 3, aquel que presentaba mejores características en el simulador solar, durante la degradación de la celda solar bajo una iluminancia de 1000 lux.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. La evolución de la curva J-V durante la degradación reduce todos sus valores eléctricos de forma progresiva. En cuanto a la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la degradación, se ve cierta tendencia a reducir estos factores a bajos voltajes y a aumentar estos factores a altos voltajes, correspondientes a R_{sh} y R_s respectivamente. Los resultados de esta medición están claramente afectados por la falta de resolución en el salto de voltaje durante la medición de J-V. Esto reduce la calidad de la derivada numérica para el cálculo de la resistencia y el factor de idealidad.

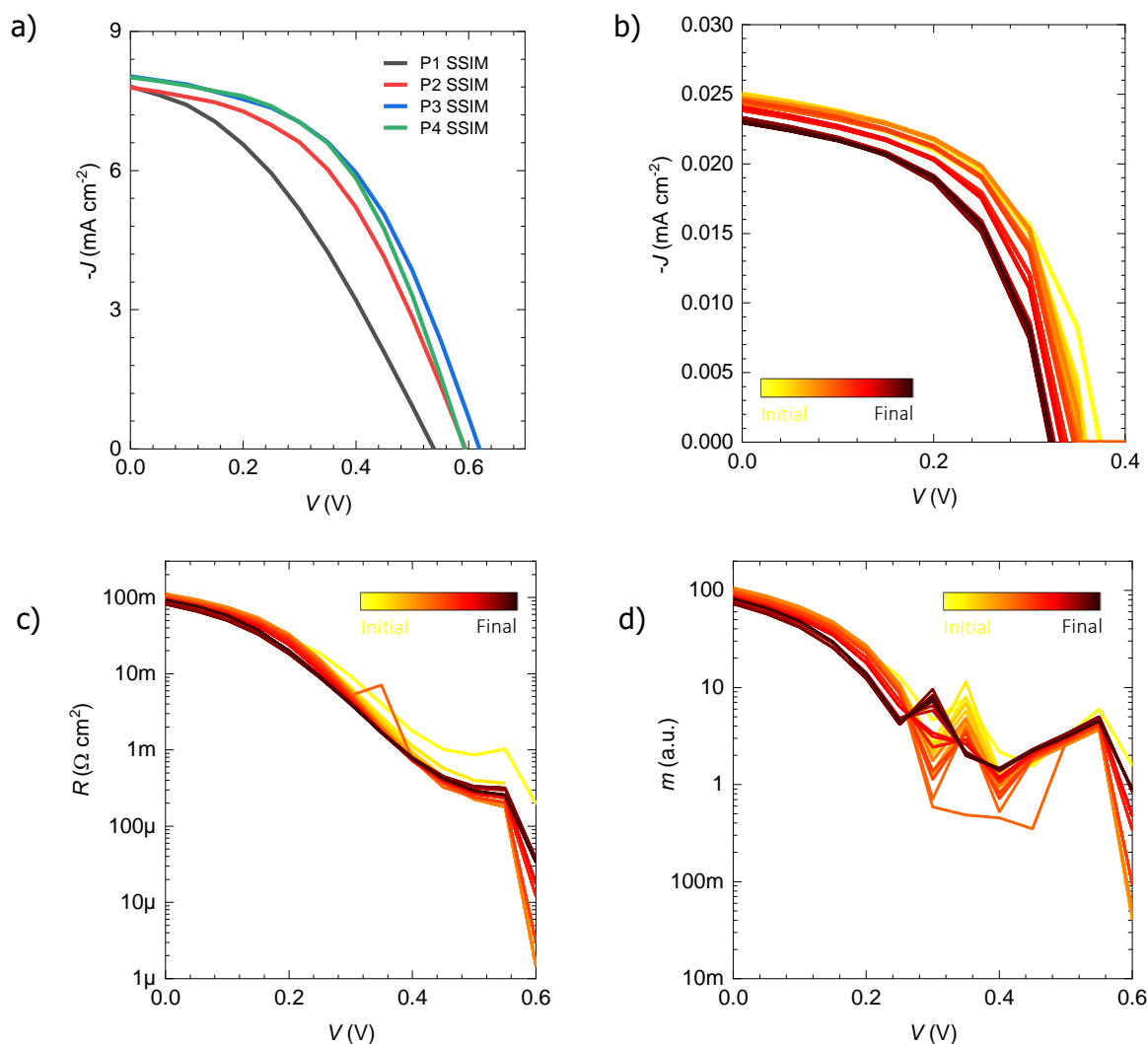


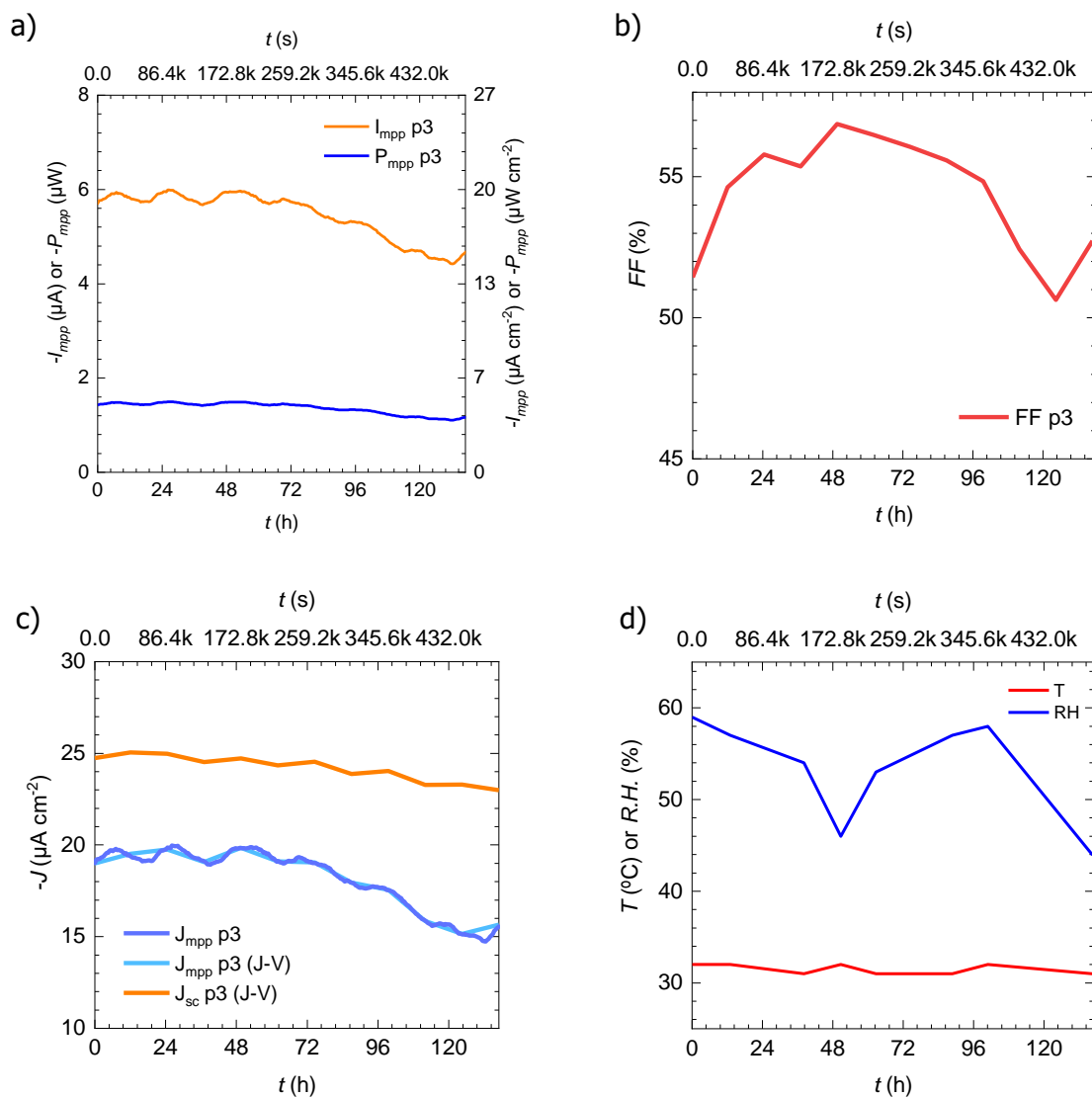
Figura 32. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra OSC2 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 3 durante la degradación bajo iluminación de 1000 lux.

En las siguientes gráficas de la muestra orgánica OSC2 se puede observar la evolución de los distintos valores eléctricos a lo largo de la degradación. El seguimiento de los valores eléctricos en esta muestra se realizó a lo largo de 137h, que corresponden a casi 6 días. Las medidas de la *Figura 33 a)* muestran la evolución de la corriente y la potencia en el punto de máxima potencia, la b) muestra la evolución del factor de llenado, en la c) las densidades de corriente para el punto de máxima potencia y para cortocircuito, en la d) la temperatura y humedad relativa en la cámara de degradación, en la e) voltajes en el punto de máxima potencia y en circuito abierto, además del voltaje en circuito abierto del píxel 4, y en la f) la potencia en el punto de máxima potencia y eficiencia de conversión de potencia.

Se pueden ver dos valores distintos para V_{mpp} , J_{mpp} , P_{mpp} y PCE que, aunque muy similares, son ligeramente distintos entre ellos. El valor del que no lleva (J-V) corresponde a la toma constante de estos parámetros a lo largo de la degradación y el valor que sí lleva (J-V) corresponde a la muestra de los valores obtenidos en las curvas J-V intermitentes.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Todos los parámetros eléctricos se ven bastante constantes a lo largo de su evolución. El factor de llenado presenta un valle justificado por la caída de la densidad de corriente en el punto de máxima potencia. Como cabía esperar, los voltajes en circuito abierto son siempre superiores

al de punto de máxima potencia dentro del mismo píxel y lo mismo sucede entre la densidad de corriente en cortocircuito y la del punto de máxima potencia. Esto no se cumple entre distintos píxeles, pues el voltaje de circuito abierto en el píxel 4, el segundo píxel con mejores características eléctricas en el simulador solar presenta voltajes superiores a los del píxel 3. La forma de los valores de potencia y PCE representados en la *Figura 33 f)* es la misma, pues la relación entre estos es la potencia incidente en la celda solar, y dado que este valor es constante, las formas de potencia generada y PCE son idénticas. La degradación está principalmente asociada a la pérdida de J_{sc} , más la reducción de V_{oc} .



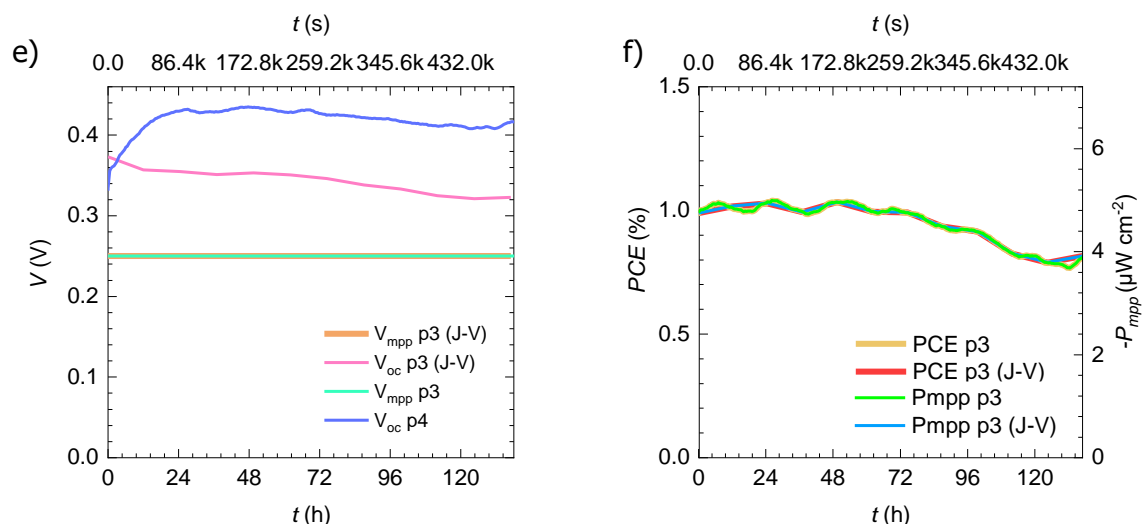


Figura 33. Evolución durante la degradación en el píxel 3 de la muestra OSC2 bajo iluminancia de 1000 lux de a) I_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y V_{oc} (p4) y f) PCE y P_{mpp} .

3.2.3. OSC3: diferentes iluminancias

La muestra OSC3 es una OSC con la referencia del fabricante A10. Para esta muestra se han realizado las mediciones para ver el comportamiento de las características de la celda solar ante diferentes iluminancias. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de las curvas J-V, R-V y m-V en el píxel 2 de la celda solar a iluminancias distintas. Las medidas de la Figura 34 a) fueron tomadas en el simulador solar, permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, y posteriormente la Figura 34 b), c) y d) muestran, respectivamente, las curvas J-V, R-V y m-V a iluminancias de 200 lux, 500 lux, 1000 lux, 2000 lux y 5000 lux en el píxel 2.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Cuanta mayor es la iluminancia que recibe la celda solar, mayores son los valores de la curva J-V.

En cuanto a la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la iluminancia, se ve cierta tendencia a encontrar mayores resistencias a menores iluminancias, pues una mayor iluminancia implica mayor potencia incidente y esto implica mayor generación de portadores y de densidad de corriente. Con todos estos resultados se puede afirmar que las celdas solares trabajan mejor a mayores iluminancias. Con la comparación de píxeles en el simulador solar de la Figura 34 a) se observa mayor homogeneidad, con la excepción del píxel 1. En la Figura 34 b), junto con los análisis de J_{sc} , V_{oc} , FF y PCE en la Figura 35 a), b), c) y d), se observa un aumento en todos los parámetros cuanto mayor es la iluminancia, justificada por una mayor potencia de entrada. Se observa una forma similar en todos los parámetros excepto en la J_{sc} , la cual aumenta de forma lineal a la iluminancia recibida. En la Figura 34 c) se observa que la saturación debajo de 0.2V es debido al efecto de resistencia shunt o paralelo, que sugiere presencia de pin-holes y defectos que causan corrientes de fuga del diodo. La saturación para voltajes superiores a 0.5 indica la transición a la conducción óhmica de resistencia serie, lo cual sugiere un problema en los contactos. La región exponencial entre 0.2 y 0.5V es donde se puede analizar las propiedades del diodo, como por ejemplo su factor de idealidad. En la Figura 34 d) se aprecia la poca calidad de las celdas, que solo presentan comportamiento rectificante (corriente exponencial) en la región entre 0.2 y 0.5 V. Esta es la región donde m tiene valores entre 1 y 2. Las regiones con $m > 2$ son dominadas por efectos de resistencia serie o paralelo, tal y como se ve en esta figura. Entonces el análisis de factor de idealidad no es válido.

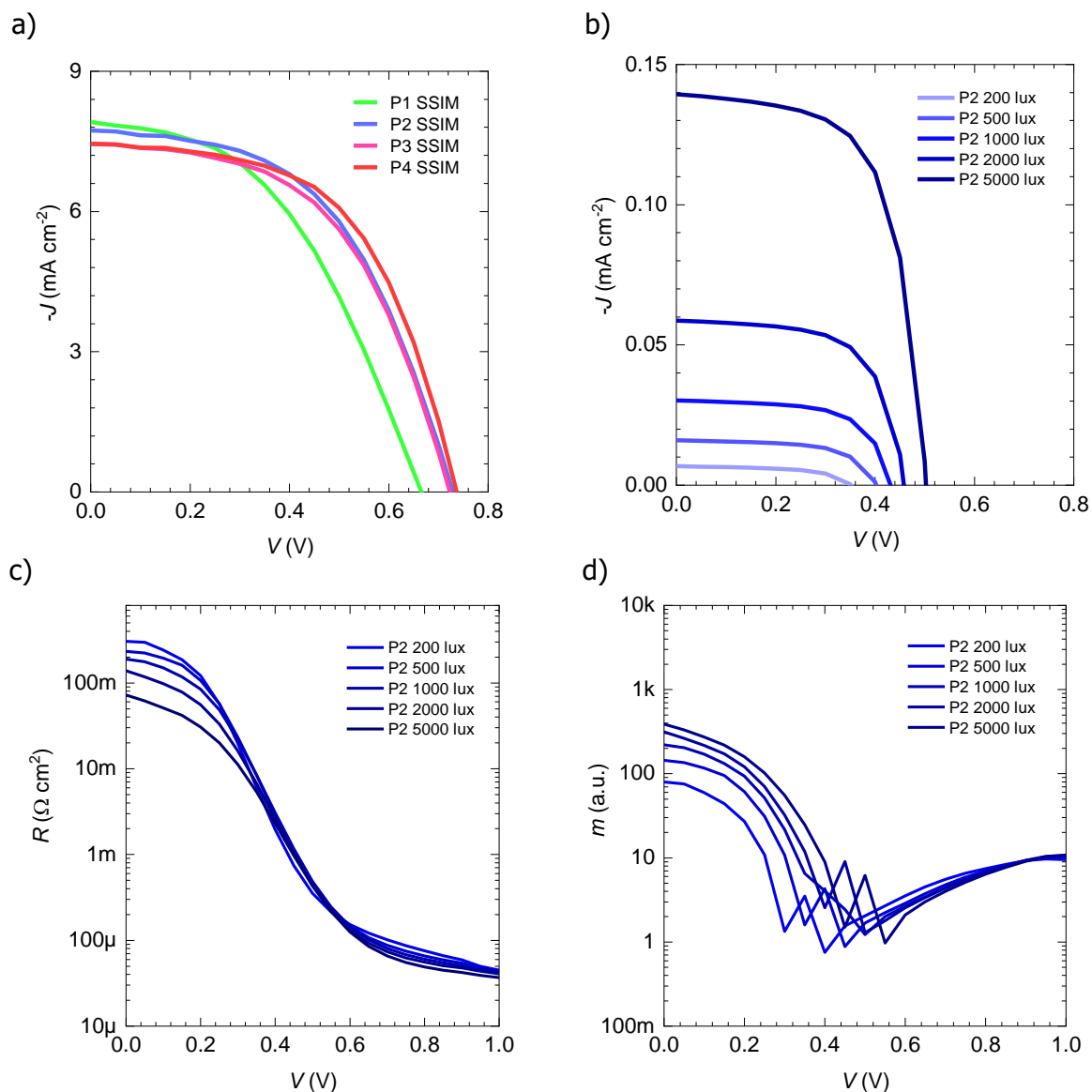


Figura 34. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra OSC3 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 2 a iluminancias de 200, 500, 1000, 2000 y 5000 lux.

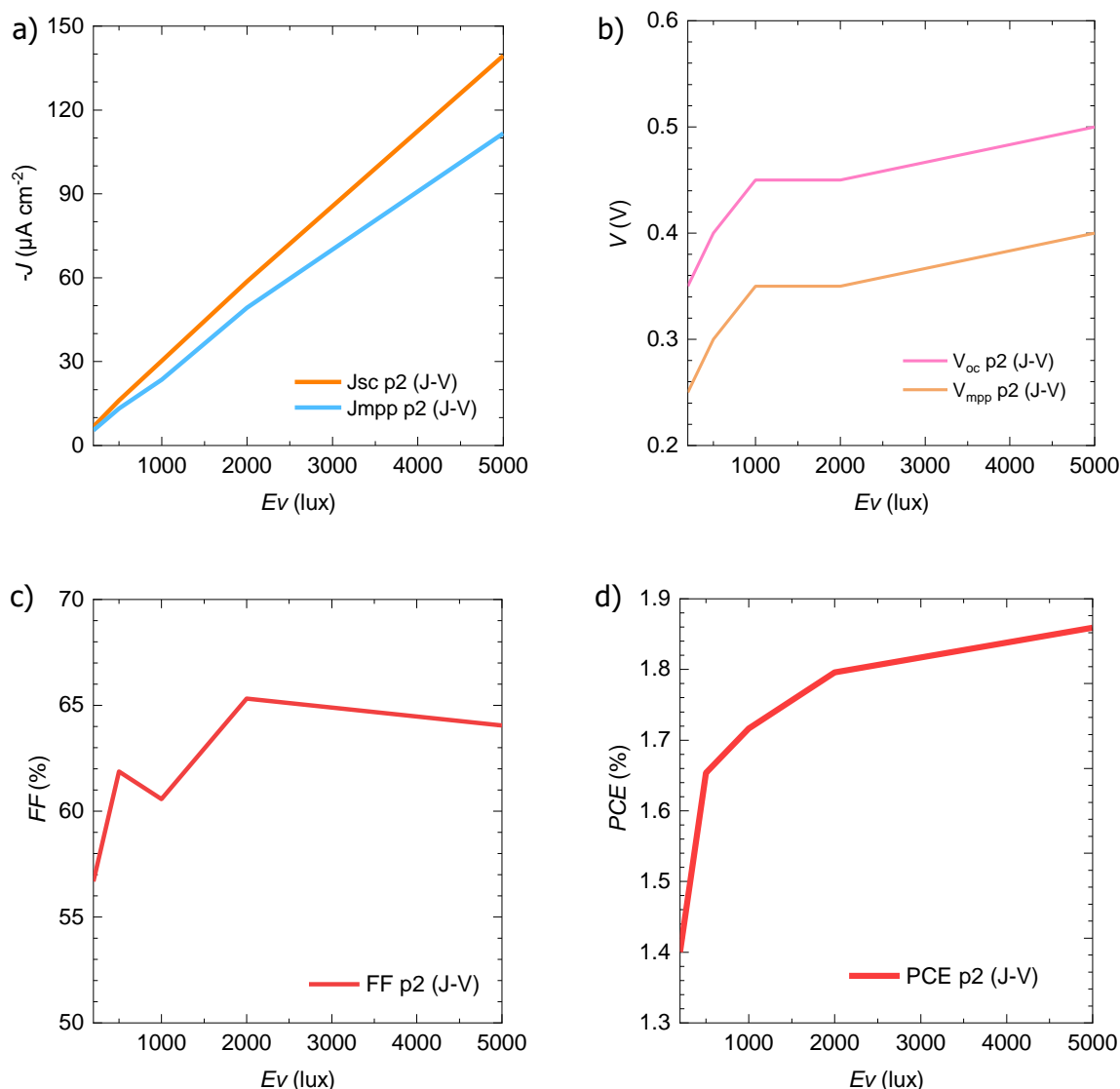


Figura 35. Comparación en el píxel 2 de la muestra OSC3 bajo distintas iluminancias de a) J_{mpp} y J_{sc} , b) V_{mpp} y V_{oc} , c) FF y f) PCE.

3.2.4. PSC4: testeo de estabilidad

La muestra PSC4 es una PSC con la referencia del fabricante N12. Para esta muestra se han realizado las mediciones para un testeo de estabilidad y así poder ver la evolución de la celda solar ante su degradación. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente, pudiendo ver el seguimiento de los valores de temperatura y humedad en la Figura 37 d. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de la curva J-V, R-V y m-V a lo largo de la degradación de la celda solar. Las medidas de la Figura 36 a) fueron tomadas en el simulador solar, permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, y posteriormente la Figura 36 b), c) y d) muestran, respectivamente, las curvas J-V, R-V y m-V en el píxel 4, aquel que presentaba mejores características en el simulador solar, durante la degradación de la celda solar bajo una iluminancia de 1000 lux. Al tratarse de una celda solar de perovskita se puede observar cómo se tomaron medidas con barrido doble (en el primer barrido con escalones ascendentes y en el segundo barrido con escalones descendentes), para captar su histéresis. Aunque había un total de 5 píxeles, tan solo aparecen 3 en la Figura 36 a), pues los otros dos presentaban curvas irregulares.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. La evolución de la curva J-V durante la degradación reduce su valor de J_{sc} pero aumenta su valor de V_{oc} . Esto implica una reducción en la generación de portadores y un empeoramiento en la absorción, pero una reducción en las barreras y recombinaciones entre capas. Los valores de voltaje y densidad de corriente para punto de máxima potencia tienen una tendencia a la baja. En cuanto a la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la degradación, se ve cierta tendencia a aumentar estos factores con la degradación.

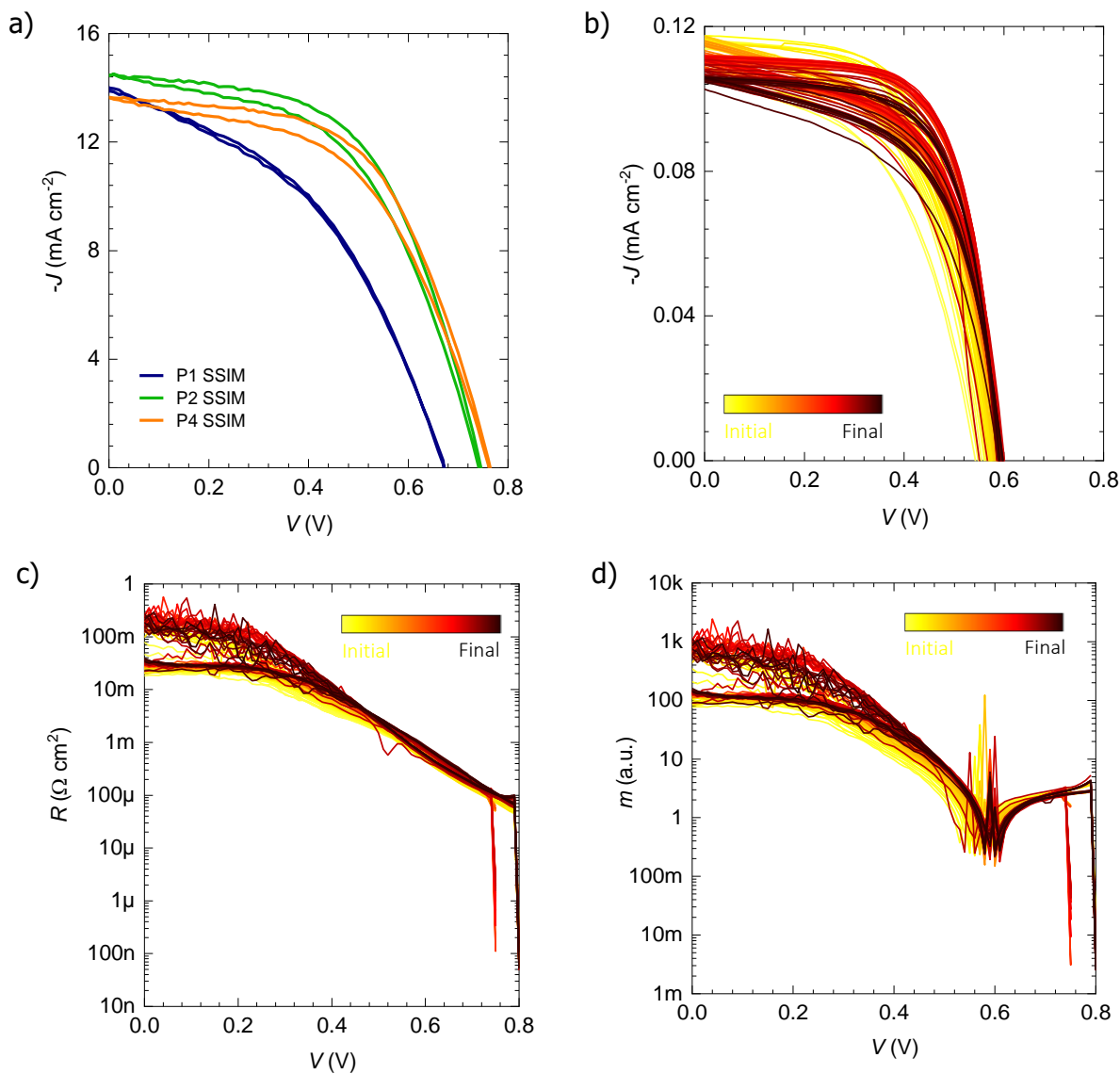


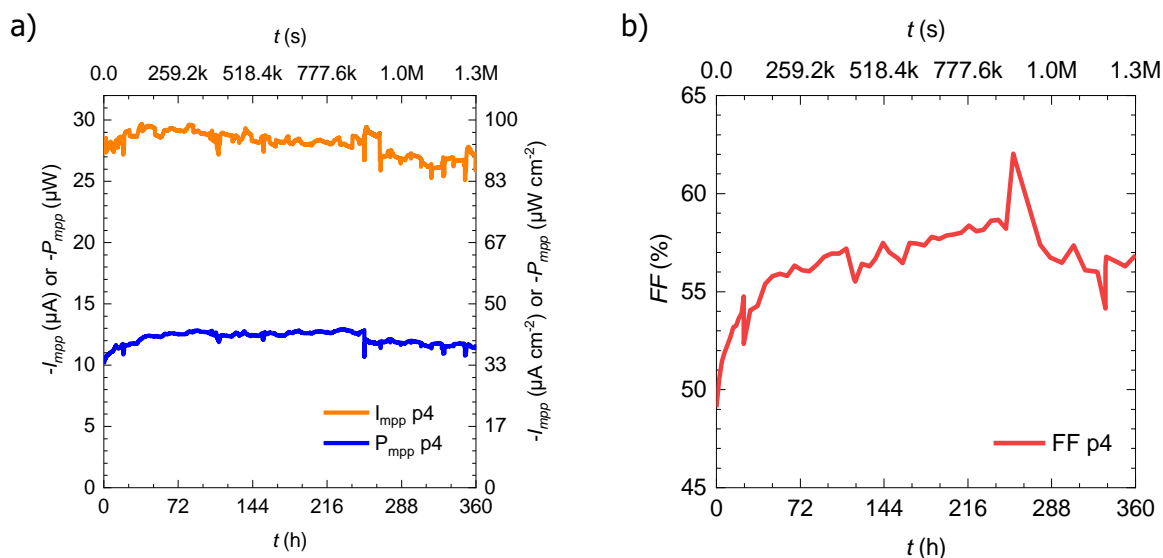
Figura 36. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC4 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 4 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.

En las siguientes gráficas de la muestra orgánica PSC4 se puede observar la evolución de los distintos valores eléctricos a lo largo de la degradación. El seguimiento de los valores eléctricos en esta muestra se realizó a lo largo de 360h, que corresponden a 15 días. Las medidas de la *Figura 37 a)* muestran la evolución de la corriente y la potencia en el punto de máxima potencia, en la *b)* muestra la evolución del factor de llenado, en la *c)* las densidades de corriente para el punto de máxima potencia y para cortocircuito, en la *d)* la temperatura y humedad relativa en la cámara de degradación, en la *e)* voltajes en el punto de máxima

potencia y en circuito abierto, además del voltaje en circuito abierto del píxel 2, y en la f) la potencia en el punto de máxima potencia y eficiencia de conversión de potencia.

Se pueden ver dos valores distintos para V_{mpp} , J_{mpp} , P_{mpp} y PCE, esta vez más distantes entre ellos. Esto se debe a que las curvas J-V se ven afectadas por la histéresis de las celdas de perovskita mientras ésta no afecta tanto en el seguimiento constante de estos valores. El valor del que no lleva (J-V) corresponde a la toma constante de estos parámetros a lo largo de la degradación y el valor que sí lleva (J-V) corresponde a la muestra de los valores obtenidos en las curvas J-V intermitentes.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Los voltajes se mantienen bastante constantes a lo largo de la degradación, aunque las densidades de corriente van decreciendo a lo largo de la degradación. Lo mismo habíamos visto en la evolución de las curvas J-V, donde se reducía el valor de J_{sc} y aumentaba el valor de V_{oc} . El factor de llenado se mantiene bastante constante pues las corrientes de cortocircuito y del punto de máxima potencia decrecen a la vez y lo mismo sucede entre el voltaje de circuito abierto y el del punto de máxima potencia. Como cabía esperar, los voltajes en circuito abierto son siempre superiores al de punto de máxima potencia dentro del mismo píxel y lo mismo sucede entre la densidad de corriente en cortocircuito y la del punto de máxima potencia. En el caso del voltaje de circuito abierto en el píxel 4, éste sigue una tendencia muy distinta al resto de voltajes, decreciendo con la degradación. La forma de los valores de potencia y PCE representados en la *Figura 37 f)* es la misma, pues la relación entre estos es la potencia incidente en la celda solar, y dado que este valor es constante, las formas de potencia generada y PCE son idénticas.



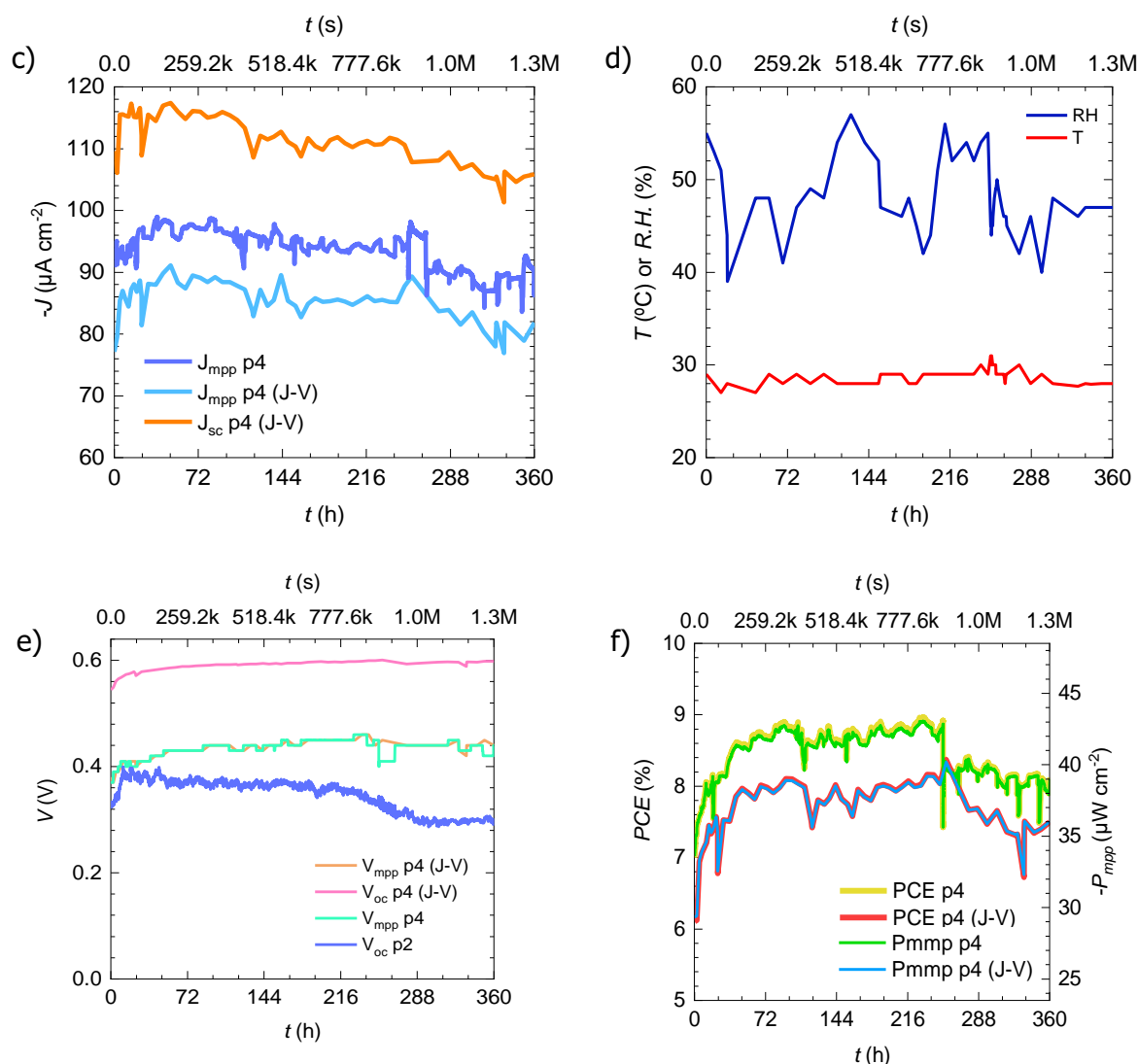


Figura 37. Evolución durante la degradación en el píxel 4 de la muestra PSC4 bajo iluminancia de 1000 lux de a) J_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y V_{oc} (p4) y f) PCE y P_{mpp} .

3.2.5. PSC5: testeo de estabilidad

La muestra PSC5 es una PSC con la referencia del fabricante c9. Para esta muestra se han realizado las mediciones para un testeo de estabilidad y así poder ver la evolución de la celda solar ante su degradación. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente, pudiendo ver el seguimiento de los valores de temperatura y humedad en la *Figura 39 d*. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de la curva J-V, R-V y m-V a lo largo de la degradación de la celda solar. Las medidas de la *Figura 38 a)* fueron tomadas en el simulador solar, permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, al principio y fin de la degradación y, posteriormente, la *Figura 38 b)*, c) y d) muestran, respectivamente, las curvas J-V, R-V y m-V en el píxel 1, aquel que presentaba mejores características en el simulador solar, durante la degradación de la celda solar bajo una iluminancia de 1000 lux. Al tratarse de una celda solar de perovskita se puede observar cómo se tomaron medidas con barrido doble (en el primer barrido con escalones ascendentes y en el segundo barrido con escalones descendentes), para captar su histéresis.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. La evolución de la curva J-V durante la degradación reduce su valor de Voc y valores de MPP, al mismo tiempo que se mantiene el valor de Jsc. Esto tiene una gran significancia, pues aumenta la recombinación, pero no se reduce la generación de portadores de carga. La reacción con los electrodos metálicos puede ser una causa principal y la densidad de defectos aumenta en mayor medida en la capa de perovskita y en la interfaz. Los valores de voltaje y densidad de corriente para punto de máxima potencia tienen una tendencia a la baja. En cuanto a la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la degradación, se ve cierta tendencia a reducir estos factores con la degradación.

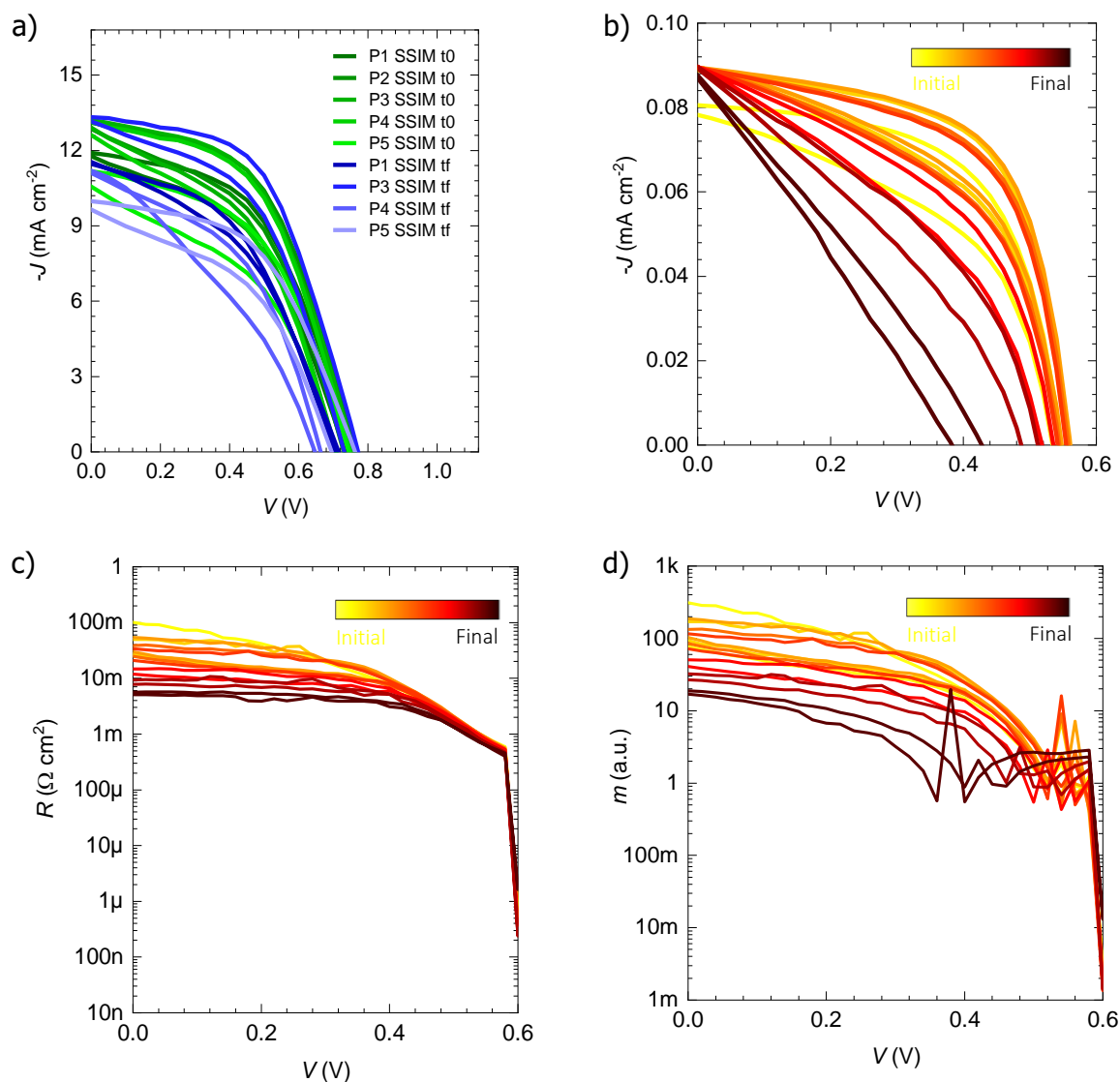


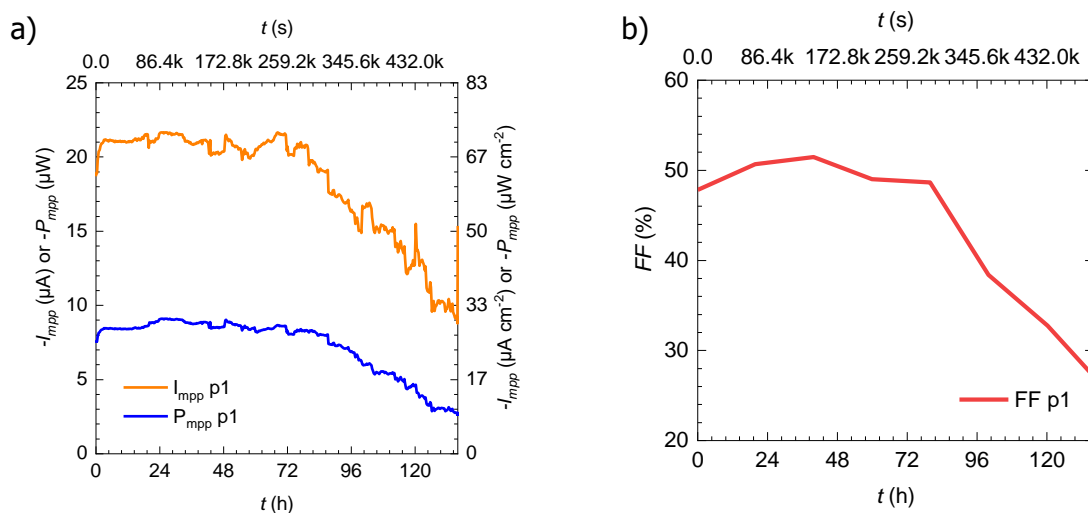
Figura 38. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC5 con el simulador solar al inicio y fin de la degradación y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 1 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.

En las siguientes gráficas de la muestra orgánica PSC5 se puede observar la evolución de los distintos valores eléctricos a lo largo de la degradación. El seguimiento de los valores eléctricos en esta muestra se realizó a lo largo de 137h, que corresponden a casi 6 días. Las medidas de la *Figura 39 a)* muestran la evolución de la corriente y la potencia en el punto de

máxima potencia, en la b) muestra la evolución del factor de llenado, en la c) las densidades de corriente para el punto de máxima potencia y para cortocircuito, en la d) la temperatura y humedad relativa en la cámara de degradación, en la e) voltajes en el punto de máxima potencia y en circuito abierto, además del voltaje en circuito abierto del píxel 2, y en la f) la potencia en el punto de máxima potencia y eficiencia de conversión de potencia.

Se pueden ver dos valores distintos para V_{mpp} , J_{mpp} , P_{mpp} y PCE, esta vez más distantes entre ellos. Esto se debe a que las curvas J-V se ven afectadas por la histéresis de las celdas de perovskita mientras ésta no afecta tanto en el seguimiento constante de estos valores. El valor del que no lleva (J-V) corresponde a la toma constante de estos parámetros a lo largo de la degradación y el valor que sí lleva (J-V) corresponde a la muestra de los valores obtenidos en las curvas J-V intermitentes.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Todos los parámetros eléctricos se ven reducidos a lo largo de su evolución. Lo mismo habíamos visto en la evolución de las curvas J-V, donde se reducía los valores de MPP y el valor de V_{oc} . Esta celda mantiene la misma J_{sc} , mientras que reduce FF y V_{oc} . El principal problema, causante de este fenómeno es la resistencia paralela, la cual va disminuyendo drásticamente. El factor de llenado se ve reducido pues V_{oc} , J_{mpp} y V_{mpp} se reducen a excepción de J_{sc} . Como cabía esperar, los voltajes en circuito abierto son siempre superiores al de punto de máxima potencia dentro del mismo píxel y lo mismo sucede entre la densidad de corriente en cortocircuito y la del punto de máxima potencia. En el caso del voltaje de circuito abierto en el píxel 2, éste sigue una tendencia muy distinta al resto de voltajes, manteniéndose constante con la degradación. La forma de los valores de potencia y PCE representados en la *Figura 39 f)* es la misma, pues la relación entre estos es la potencia incidente en la celda solar, y dado que este valor es constante, las formas de potencia generada y PCE son idénticas.



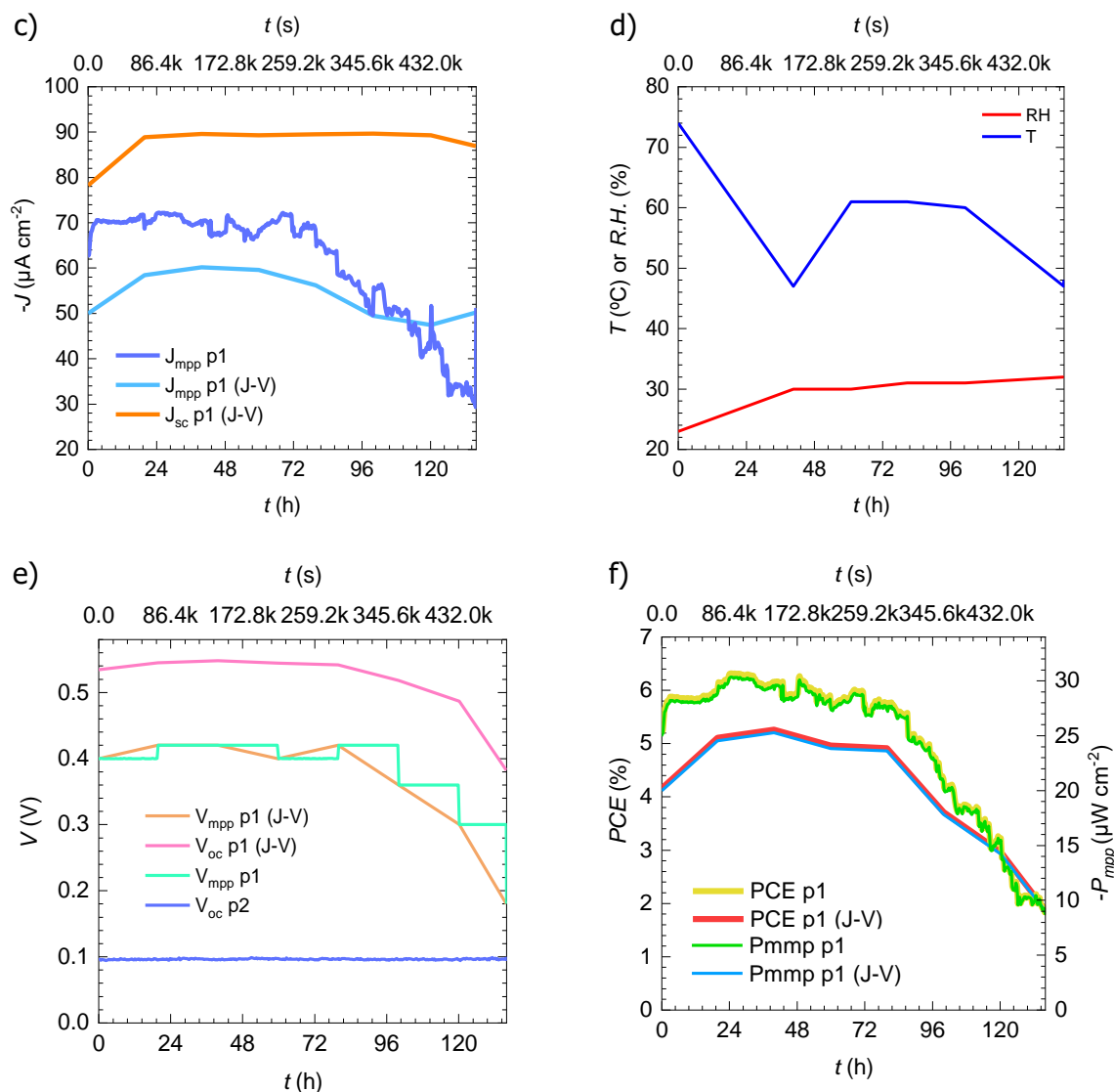


Figura 39. Evolución durante la degradación en el píxel 1 de la muestra PSC5 bajo iluminación de 1000 lux de a) I_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y V_{oc} (p2) y f) PCE y P_{mpp} .

3.2.6. PSC6: testeo de estabilidad

La muestra PSC6 es una PSC con la referencia del fabricante x1. Para esta muestra se han realizado las mediciones para un testeo de estabilidad y así poder ver la evolución de la celda solar ante su degradación. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente, pudiendo ver el seguimiento de los valores de temperatura y humedad en la *Figura 41* d. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de la curva J-V, R-V y m-V a lo largo de la degradación de la celda solar. Las medidas de la *Figura 40* a) fueron tomadas en el simulador solar, permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, y posteriormente la *Figura 40* b), c) y d) muestran, respectivamente, las curvas J-V, R-V y m-V en el píxel 4, aquel que presentaba mejores características en el simulador solar, durante la degradación de la celda solar bajo una iluminancia de 1000 lux. Al tratarse de una celda solar de perovskita se puede observar cómo se tomaron medidas con barrido doble (en el primer barrido con escalones ascendentes y en el segundo barrido con escalones descendentes), para

captar su histéresis. Aunque había un total de 5 píxeles, tan solo aparecen 3 en la *Figura 40 a)*, pues los otros dos presentaban curvas irregulares.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. La evolución de la curva J-V durante la degradación reduce su valor de J_{sc} pero aumenta su valor de V_{oc} . Los valores de voltaje y densidad de corriente para punto de máxima potencia tienen una tendencia a la baja. En cuanto a la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la degradación, se ve cierta tendencia a aumentar estos factores con la degradación.

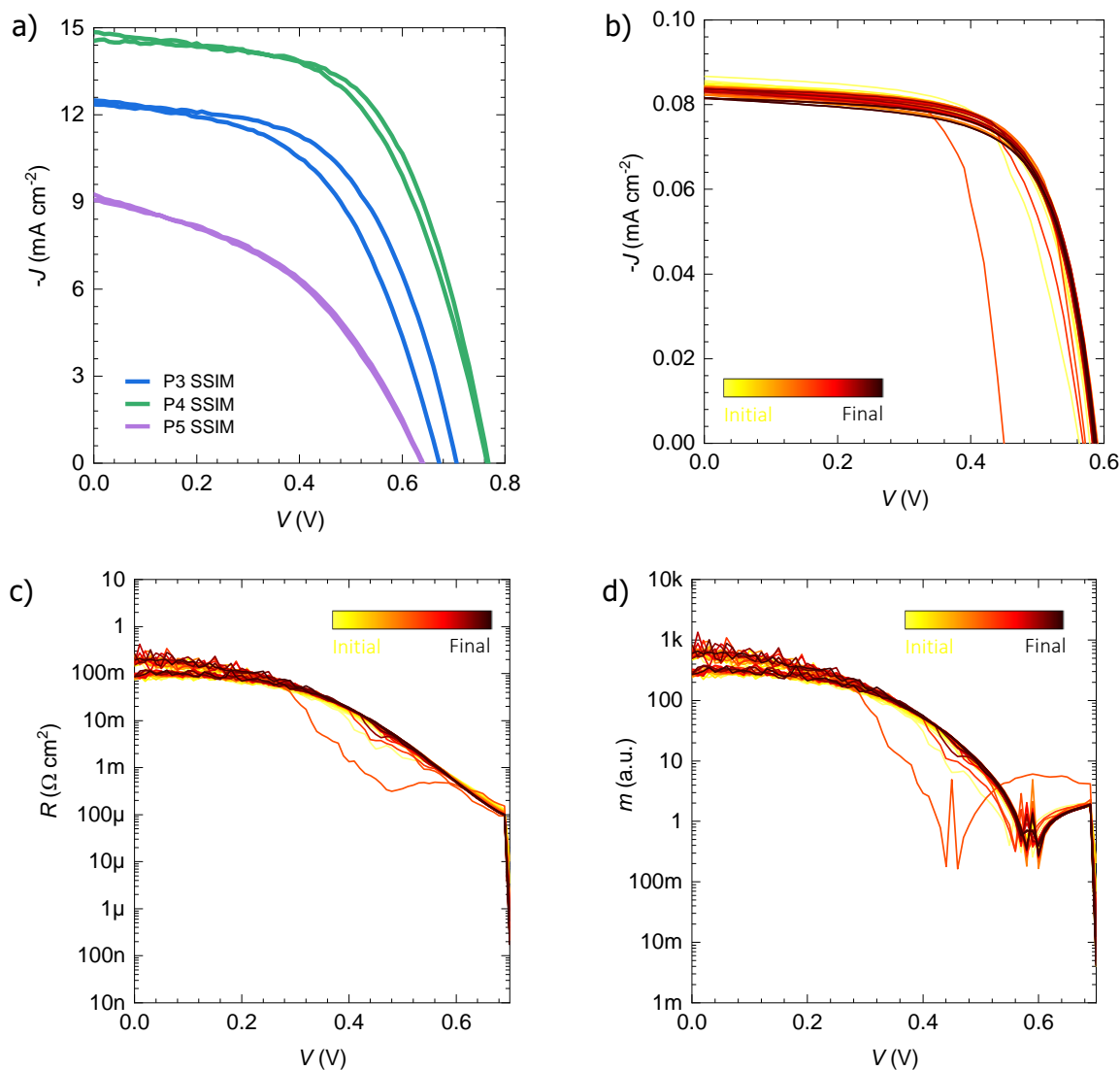
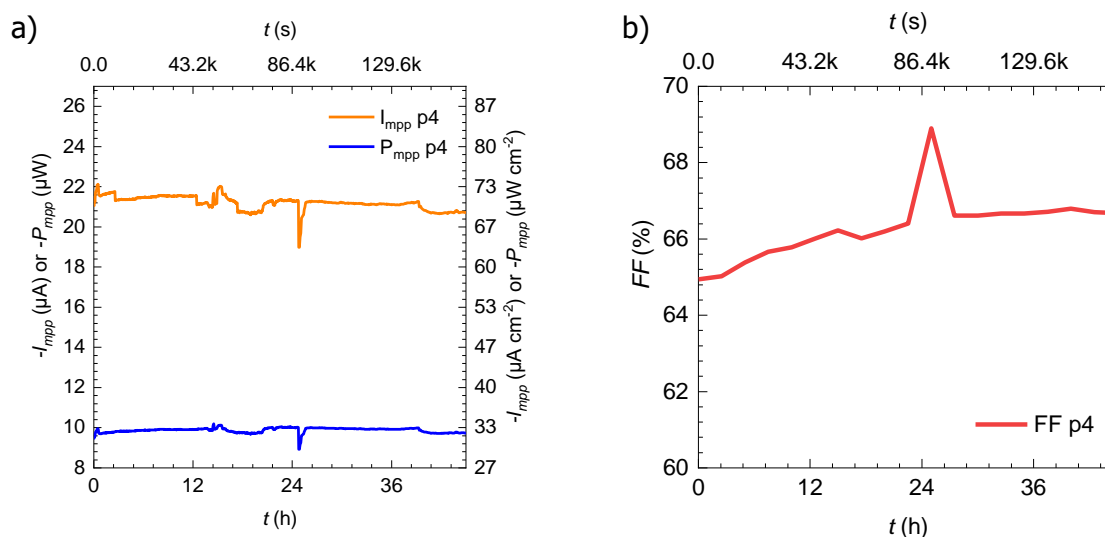


Figura 40. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC6 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en el píxel 4 durante la degradación bajo iluminancia de 1000 lux.

En las siguientes gráficas de la muestra de perovskita PSC6 se puede observar la evolución de los distintos valores eléctricos a lo largo de la degradación. El seguimiento de los valores eléctricos en esta muestra se realizó a lo largo de 45h, que corresponde a casi 2 días. Las medidas de la *Figura 41 a)* muestran la evolución de la corriente y la potencia en el punto de máxima potencia, en la b) muestra la evolución del factor de llenado, en la c) las densidades de corriente para el punto de máxima potencia y para cortocircuito, en la d) la temperatura y humedad relativa en la cámara de degradación, en la e) voltajes en el punto de máxima potencia y en circuito abierto, además del voltaje en circuito abierto del píxel 3, y en la f) la potencia en el punto de máxima potencia y eficiencia de conversión de potencia.

Se pueden ver dos valores distintos para V_{mpp} , J_{mpp} , P_{mpp} y PCE, esta vez ligeramente distantes entre ellos. Esto se debe a que las curvas J-V se ven afectadas por la histéresis de las celdas de perovskita mientras ésta no afecta tanto en el seguimiento constante de estos valores. El valor del que no lleva (J-V) corresponde a la toma constante de estos parámetros a lo largo de la degradación y el valor que sí lleva (J-V) corresponde a la muestra de los valores obtenidos en las curvas J-V intermitentes.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Todos los parámetros eléctricos se mantienen bastante constantes a lo largo de la degradación, debiéndose también a un periodo corto de degradación. El factor de llenado se mantiene bastante constante pues las corrientes de cortocircuito y del punto de máxima potencia y el voltaje de circuito abierto y el del punto de máxima potencia se mantienen constantes. Los voltajes en circuito abierto son superiores al de punto de máxima potencia dentro del mismo píxel, y lo mismo sucede entre la densidad de corriente en cortocircuito y la del punto de máxima potencia. En el caso del voltaje de circuito abierto en el píxel 3, éste sigue una tendencia muy distinta al resto de voltajes, creciendo con la degradación. La forma de los valores de potencia y PCE representados en la *Figura 41 f)* es la misma, pues la relación entre estos es la potencia incidente en la celda solar, y dado que este valor es constante, las formas de potencia generada y PCE es idéntica.



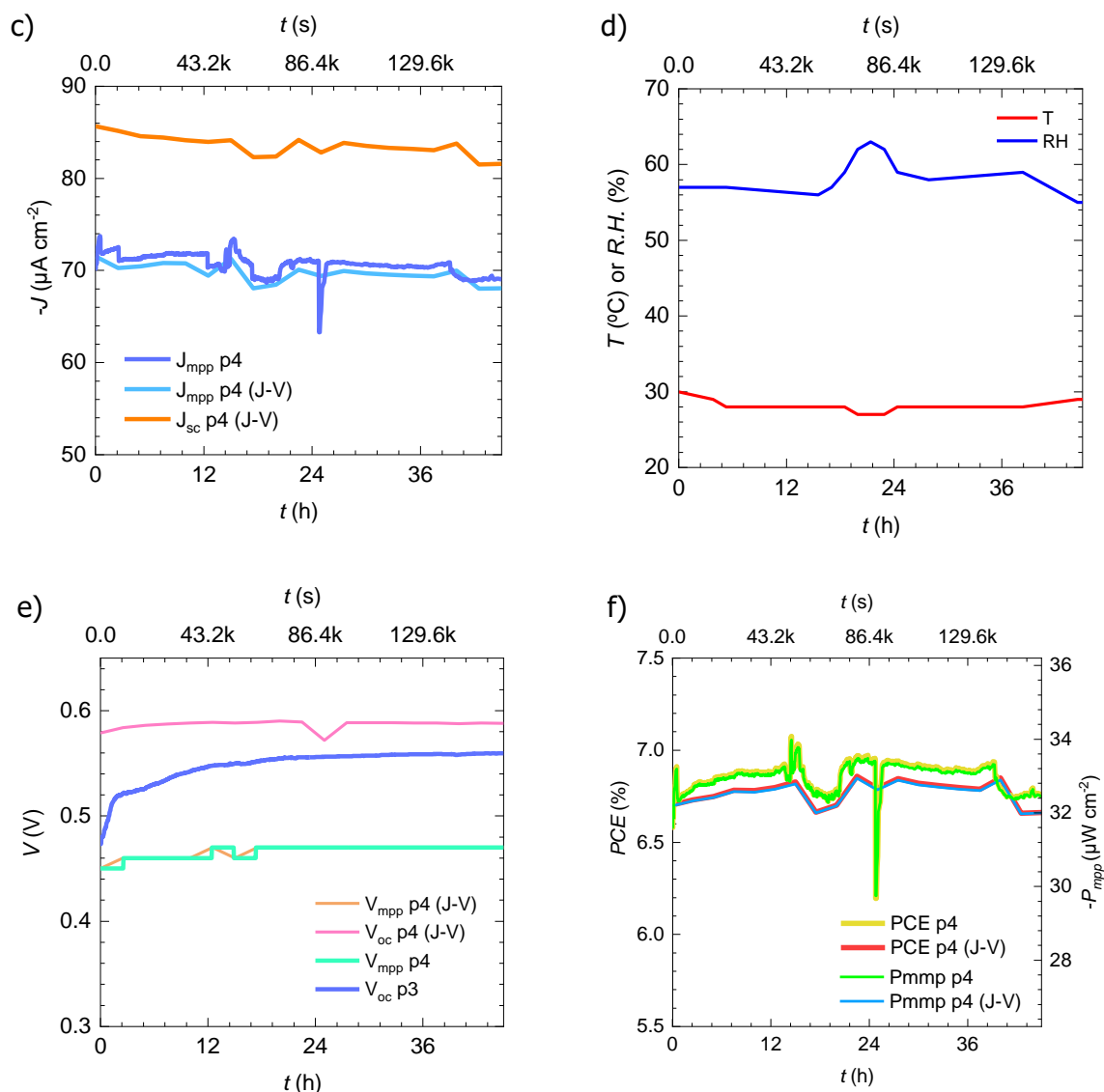


Figura 41. Evolución durante la degradación en el píxel 4 de la muestra PSC7 bajo iluminancia de 1000 lux de a) J_{mpp} y P_{mpp} , b) FF, c) J_{mpp} y J_{sc} , d) T^a y RH, e) V_{mpp} , V_{oc} y V_{oc} (p3) y f) PCE y P_{mpp} .

3.2.7. PSC7: diferentes iluminancias

La muestra PSC7 es una PSC con la referencia del fabricante c11. Para esta muestra se han realizado las mediciones para ver el comportamiento de las características de la celda solar ante diferentes iluminancias. Las medidas han sido tomadas en condiciones ambiente. En las siguientes gráficas de esta muestra se puede observar la comparación de la curva J-V, R-V y m-V entre píxeles de la celda solar a iluminancias distintas. Las medidas de la *Figura 42 a)* fueron tomadas en el simulador solar, permitiendo una caracterización de la celda a 1 sol, y posteriormente la *Figura 42 b)*, c) y d) muestran, respectivamente, las curvas J-V, R-V y m-V a iluminancias de 200 lux, 500 lux, 1000 lux, 2000 lux y 5000 lux. Al tratarse de una celda solar de perovskita, se puede observar cómo se tomaron medidas con barrido doble (en el primer barrido con escalones ascendentes y en el segundo barrido con escalones descendentes), para captar su histéresis.

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones. Cuanta mayor es la iluminancia que recibe la celda solar, mejores son los valores de la curva J-V. Aunque la celda de perovskita tiene 5 píxeles, tan solo se muestran los 3 últimos píxeles porque

el resto mostraban irregularidades. En esta muestra no se puede observar similitud de magnitudes a iluminancias iguales entre los distintos píxeles, pues algunos han visto deterioradas mucho más sus curvas J-V, viendo una heterogeneidad entre los distintos píxeles. En cuanto a la relación entre la resistencia y el factor de idealidad con la iluminancia, se ve cierta tendencia a encontrar mayores resistencias a menores iluminancias y mayores factores de idealidad a mayores iluminancias. Con todos estos resultados se puede afirmar que las celdas solares trabajan mejor a mayores iluminancias.

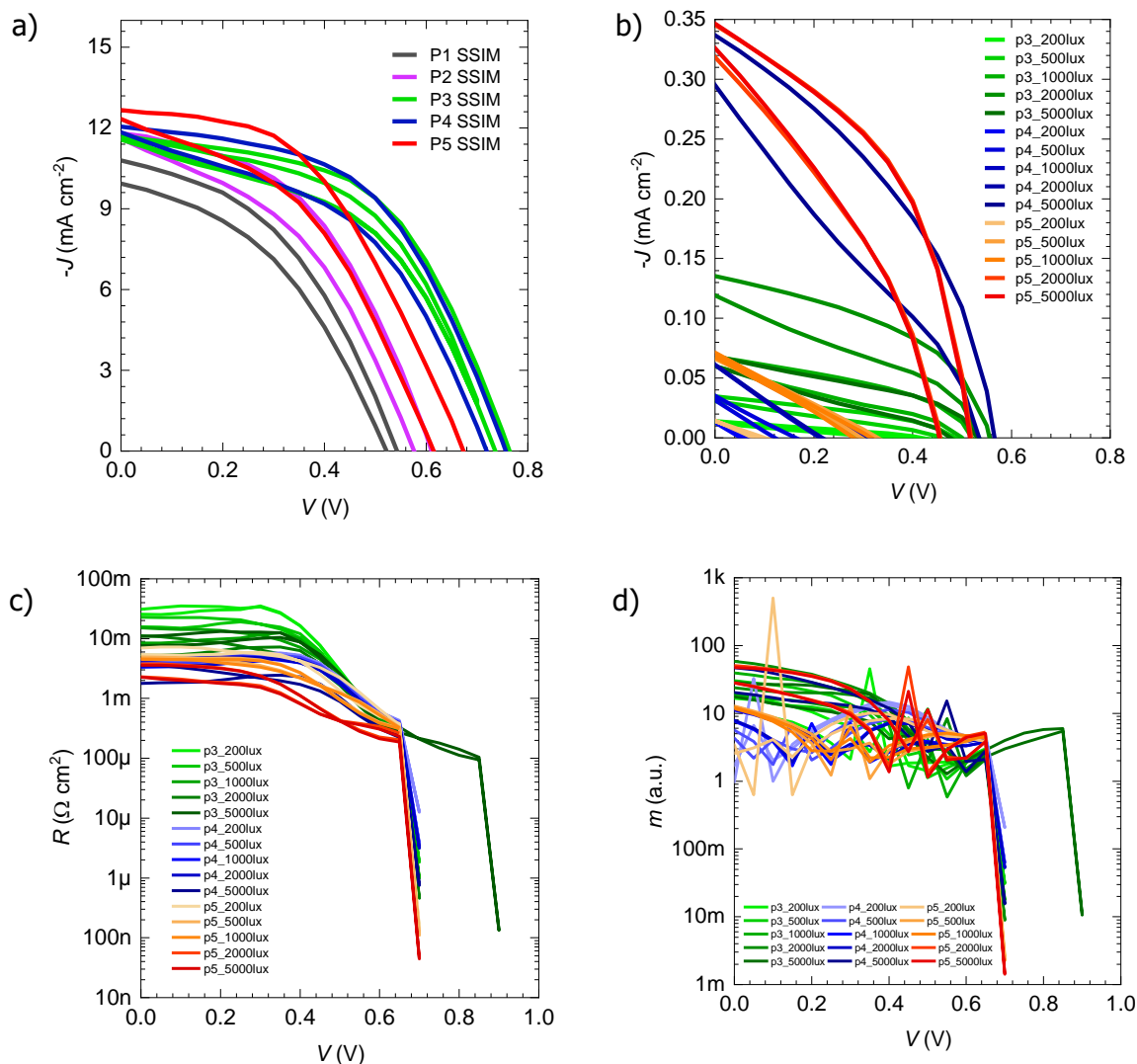


Figura 42. a) Comparativa de la curva J-V en los distintos píxeles de la muestra PSC7 con el simulador solar y comparativa de la b) curva J-V c) R-V y d) m-V en los distintos píxeles a iluminancias de 200, 500, 1000, 2000 y 5000 lux.

3.2.8. Discusión sobre las celdas solares medidas

Con todas las muestras analizadas se pueden sacar unas conclusiones cualitativas y unas conclusiones cuantitativas.

En primer lugar, con las conclusiones cualitativas, se puede observar que los valores de tensión y voltaje medidos, con sus correspondientes parámetros calculados, no son muy buenos. Motivo de ello es el hecho que las muestras orgánicas utilizadas forman parte de un proyecto de investigación en la fabricación de éstas, además de que su análisis, en la mayoría de los casos, no se realizaba justo después de su fabricación ni eran conservadas en las mejores condiciones hasta ese momento. Las celdas solares de perovskita, al ser enviadas desde otra universidad, tampoco permitían un análisis inmediato tras su fabricación. Por este motivo, cuando se empezaba el análisis de las celdas en el laboratorio de la URV, estas ya habían padecido una degradación por contacto con agentes extrínsecos como són oxígeno, temperatura o humedad. Estos factores degradan los materiales de las capas de las celdas y empeoran su estabilidad, rendimiento y eficiencia.

Se ha podido observar además una heterogeneidad entre los distintos píxeles de las celdas solares, motivo de ello son las irregularidades en los espesores y materiales de las capas. Este hecho queda muy evidente en la muestra PSC7, analizando las curvas J-V con distintas iluminancias en los distintos píxeles, aunque se mantiene más homogéneo en la muestra OSC3, en la que se realizaba el mismo análisis.

Respecto a las gráficas de resistencia con respecto al rango de voltaje, se conoce la existencia de dos tipos de resistencias principales: Rsh y Rs. Rsh se refiere a la resistencia en el extremo de voltajes más cercanos a 0 V y es preferible que sea alta, ya que esto indica menos defectos y fugas de corriente en la celda. Rs, por otro lado, corresponde a la resistencia en el extremo de voltajes más cercanos al Voc, y es mejor que sea baja para reducir las pérdidas de voltaje por efecto óhmico. Cuando la resistencia es constante (ya sea Rsh o Rs), no se puede definir el factor de idealidad, que es un parámetro importante para caracterizar el diodo y no las resistencias parásitas. El factor de idealidad debe estar entre 1 y 2 (siendo 1 lo ideal) en la región central de los voltajes, donde las resistencias Rsh y Rs no tienen influencia. Si el factor de idealidad (m) supera 2 incluso en esta región, significa que la celda es de mala calidad y tendrá un factor de llenado (FF) muy bajo. En resumen, las mejores celdas solares deben tener un Rsh muy alto, un Rs muy bajo y un factor de idealidad de 1.

Para el análisis de las muestras en las que se realizó seguimiento MPP, se procede con resultados cuantitativos que permitan discernir las mejores muestras y la mejor tipología entre OSCs y PSCs. Para realizar las conclusiones cuantitativas se han realizado los cálculos del porcentaje de reducción o mejora que han recibido los parámetros indicativos de estabilidad Jsc, Voc, FF y PCE. Para ello la *Tabla 6* lista los valores iniciales y finales de estos parámetros previos y posteriores a su degradación en la cámara de degradación bajo la iluminación de la lámpara a 1000 lux. Se puede ver como en algunas muestras, algunos de los parámetros han mejorado en lugar de empeorarse. Motivo de ello es la buena calidad de las celdas solares. En la tabla se puede observar con porcentajes en verde aquellos que mejoran y con porcentajes en rojo aquellos que empeoran. Aunque algunos porcentajes presenten decrementos menores, cabe destacar que es importante ver el valor de partida junto con su empeoramiento para sacar una conclusión. Ejemplo de ello es la Voc de la muestra OSC2, que, aunque presenta una reducción del 13.445%, esta tiene un valor de partida de 0.37314 V, inferior a todo el resto con porcentajes de empeoramiento mayores.

Otro punto a tener en cuenta es el tiempo en que la muestra ha estado sometida bajo iluminación. Por ejemplo, la muestra PSC6 presenta unos resultados muy buenos, pero tan solo ha estado 45h bajo la lámpara. Es por ello por lo que resulta de utilidad el cálculo de la ratio de degradación DR, la cual se muestra en la *Tabla 7* para todas las muestras con seguimiento MPP.

Tabla 6. Resumen de resultados en las mediciones de las distintas muestras.

	Jsc ₀ (mA/cm ²)	Voc ₀ (V)	FF ₀ (%)	PCE ₀ (%)
	Jsc _F (mA/cm ²)	Voc _F (V)	FF _F (%)	PCE _F (%)
	(Jsc ₀ -Jsc _F) / Jsc ₀	(Voc ₀ -Voc _F) / Voc ₀	(FF ₀ -FF _F) / FF ₀	(PCE ₀ -PCE _F) / PCE ₀
OSC1	25.07463*	0.76996	21.11206	100.00000**
t. testeo:	19.24574*	0.45994	14.37528	48.90771**
7h	-23.246%	-40.264%	-31.910%	-51.092%
OSC2	0.02473	0.37314	51.43726	0.98849
t. testeo:	0.02299	0.32297	52.72610	0.81528
137h	-7.036%	-13.445%	+2.506%	-17.523%
PSC4	0.110	0.545	49.100	6.104
t. testeo:	0.106	0.598	56.849	7.499
360h	-3.394%	+9.822%	+15.782%	+22.840%
PSC5	0.078	0.534	47.822	4.164
t. testeo:	0.087	0.383	27.209	1.884
137h	+11.053%	-28.409%	-43.104%	-54.762%
PSC6	0.086	0.579	64.937	6.703
t. testeo:	0.082	0.588	66.675	6.662
45h	-4.740%	+1.623%	+2.676%	-0.609%

* Las medidas fueron tomadas en el simulador solar y por ello sus valores de corriente de cortocircuito son superiores al del resto de muestras.

** En esta muestra se tomó la eficiencia inicial como referencia del 100% y a partir de esta se tomaron las siguientes eficiencias como % reducido respecto a esta referencia.

A continuación, se muestran en la *Tabla 7* los valores de la ratio de degradación DR, calculados para cada muestra con los valores de la *Tabla 6*. La ecuación para el cálculo de esta ratio se muestra en la *Ecuación 16*. Estos valores permiten comparar la degradación de los valores PCE, independientemente del tiempo al que han estado degradadas bajo iluminación las muestras. Para interpretar estos valores, cuanto más cerca de 0 sea el resultado de la degradación, mejor es la muestra. Una excepción la encontramos en la muestra PSC4, la cual, en vez de presentar un empeoramiento en esta ratio, presenta una mejora.

Tabla 7. Resumen de ratio de degradación en las mediciones de las distintas muestras.

	OSC1	OSC2	PSC4	PSC5	PSC6
DR (%/h)	-7.29890	-0.00126	0.00387	-0.01664	-0.00091

Con todos los resultados analizados en la *Tabla 6* y *Tabla 7* se puede afirmar que las muestras PSCs son las que presentan mejor estabilidad, particularmente la PSC4 (ref. sustrato del fabricante N12).

4. Conclusiones

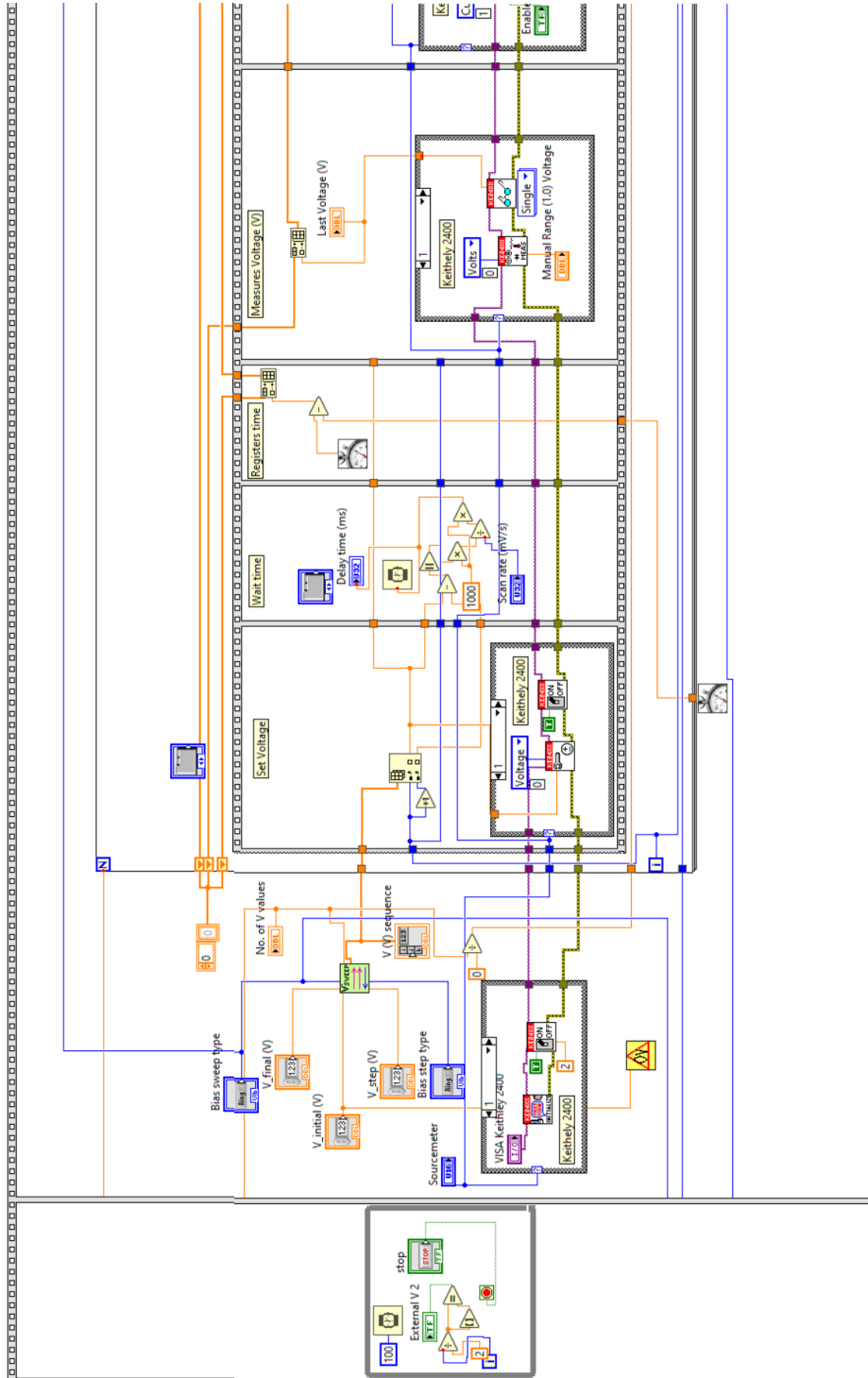
Este proyecto se centró en la optimización de celdas solares de perovskita y orgánicas, con un enfoque particular en la medición y evaluación de su estabilidad y rendimiento operacional. Para alcanzar este objetivo inicial, se desarrollaron e implementaron diversas herramientas y metodologías, tanto teóricas como experimentales. Los resultados obtenidos abarcan desde un sistema automatizado para el testeo de celdas solares, hasta la investigación de conceptos relacionados con las celdas solares y la toma de mediciones experimentales, con su posterior análisis, bajo diferentes condiciones de operación. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo, que reflejan los avances logrados en cada uno de los objetivos planteados.

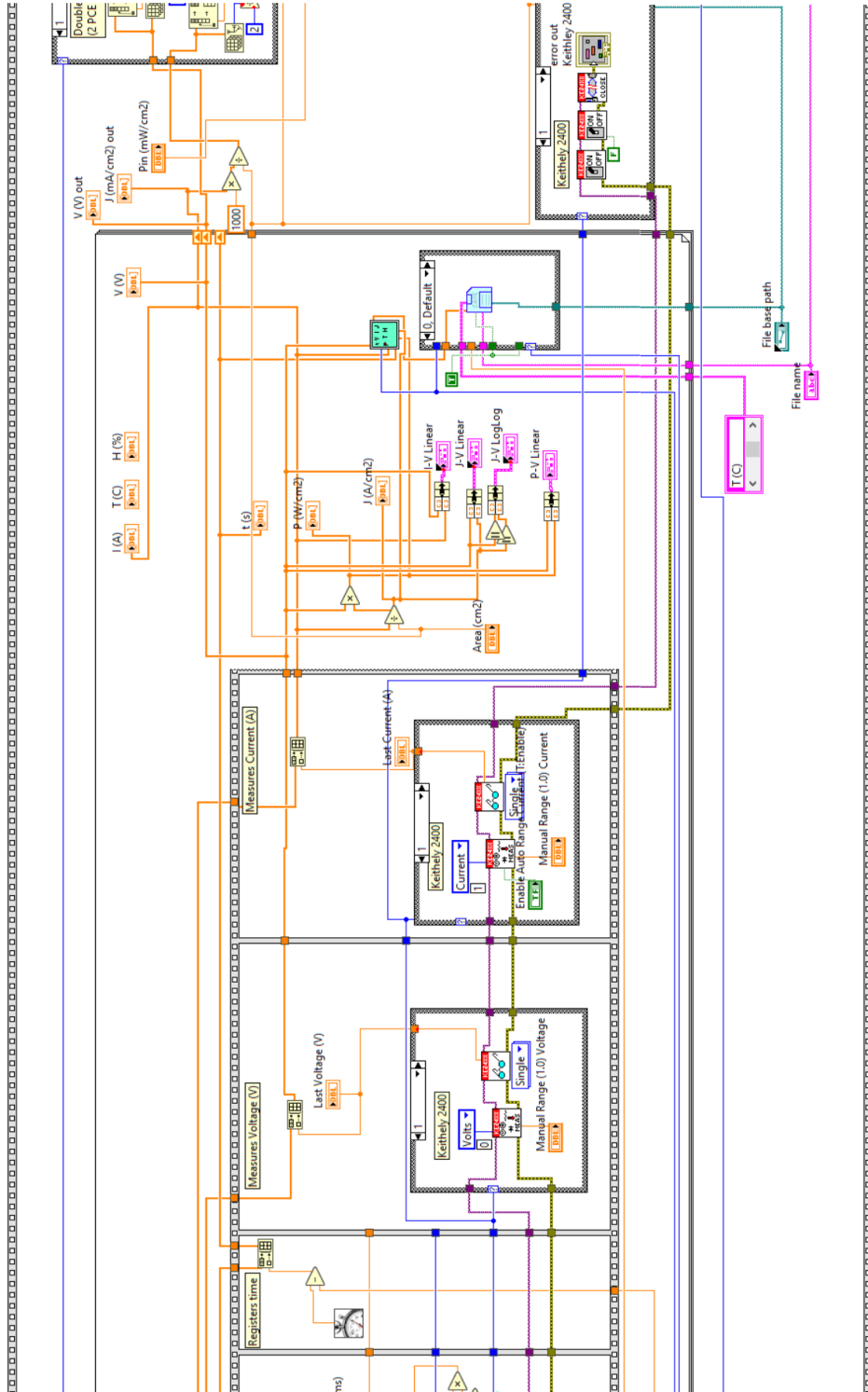
- 1) Automatización de equipo de testeo para la medición de estabilidad operacional en OSCs y PSCs: Se diseñó, construyó y testeó la implementación del kit Arduino UNO para la medición de voltajes, temperatura y humedad. Esta implementación agrupa la shield de conexionado de bananas, la estructura modular de protección, las estructuras de soporte para las muestras, la programación para la toma de valores del microcontrolador del kit Arduino UNO con Arduino IDE en lenguaje C, la programación en NI LabVIEW con diagrama de bloques para la toma de medidas y la interfaz entre Arduino y LabVIEW y el conexionado y montaje de todos los anteriores. Este sistema permitirá realizar pruebas sobre la estabilidad de las celdas solares emergentes con equipos más asequibles que los del mercado, aunque con una breve demora de actualización y menor precisión, obteniendo resultados aceptables.
- 2) Evaluación del Rendimiento y Estabilidad de Tecnologías Emergentes: Se llevaron a cabo mediciones de la estabilidad en celdas solares basadas en tecnologías emergentes como las de perovskita y orgánicas. Se realizó la medición de curvas J-V bajo diversas condiciones de iluminación y se analizaron parámetros clave como J_{sc} , V_{oc} , FF, PCE, R y m durante las pruebas de estabilidad operacional. Estos análisis permitieron obtener unos resultados para identificar las mejores tecnologías y modelos entre todos los analizados.
- 3) Familiarización y Dominio de Conceptos Teóricos Clave: El proyecto permitió la profundización con conceptos fundamentales que determinan el rendimiento de celdas solares, como J_{sc} , V_{oc} , FF, PCE, MPP y DR.

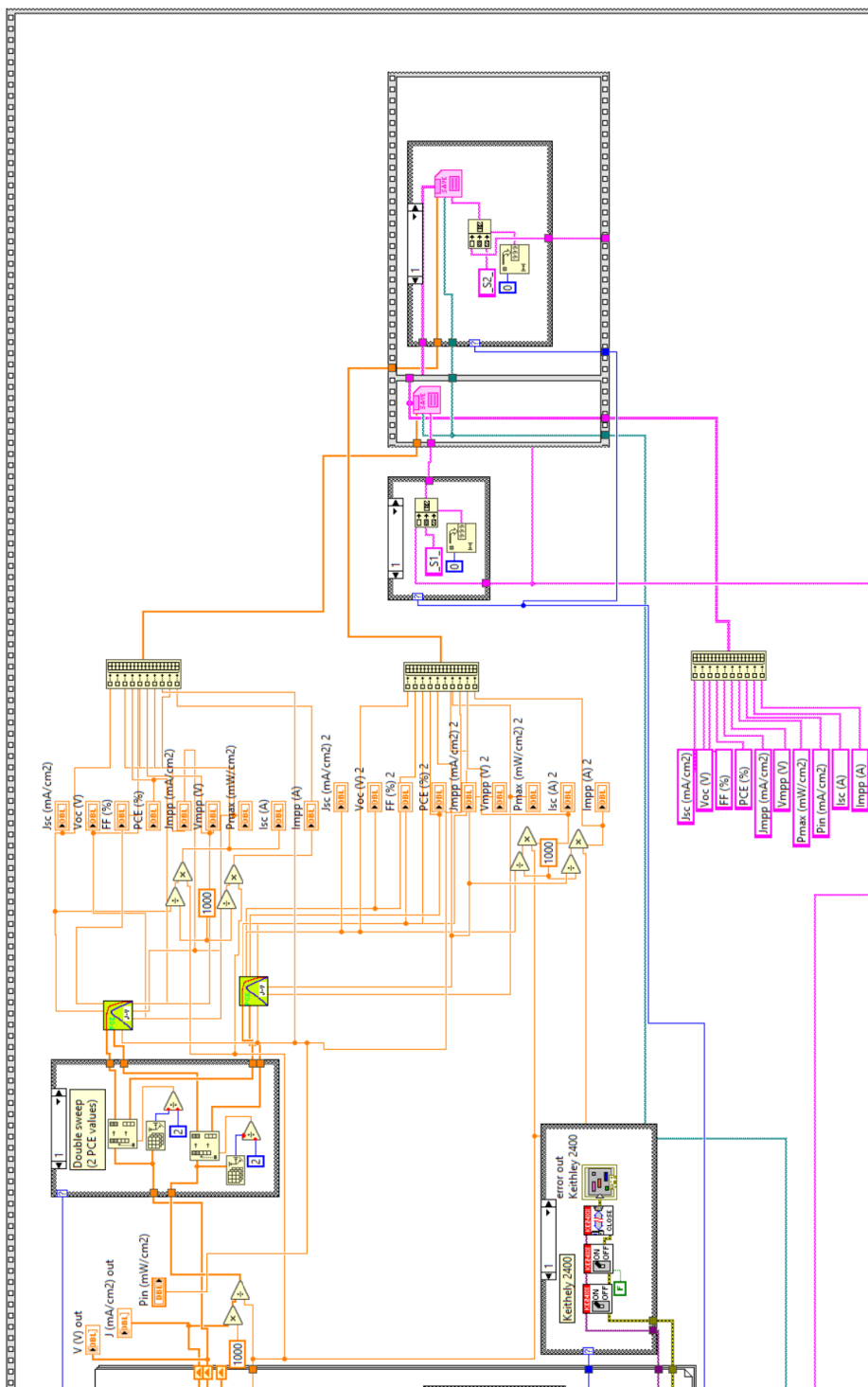
En resumen, el proyecto no solo logró desarrollar herramientas y sistemas de medición automatizados clave para la evaluación de celdas solares emergentes, sino que también permitió una comprensión de los principios físicos y la medición experimental necesarios para optimizar estas tecnologías. Esto sienta las bases para futuros desarrollos y mejoras en el ámbito de la energía solar y para plantear futuros proyectos a desarrollar en la URV. Algunas ideas para estos proyectos podrían ser el control automatizado de temperatura con un sistema de refrigeración en la cámara de degradación; el registro de la intensidad luminosa durante el test, midiendo la fotocorriente de un diodo de referencia, para comprobar que la lámpara se mantiene estable; o la automatización en el software del cálculo de resistencias y factores de idealidad.

5. Anexo

En las *Figura 18* se mostraba el diagrama de bloques de la lógica de la programación J-V en LabVIEW. En aquella figura no se podían apreciar detalles en el diagrama de bloques, es por ello por lo que en este Anexo se ha querido presentar el diagrama de bloques más ampliado.







6. Referencias

- [1] Almora, O., Cabrera, C. I., Erten-Ela, S., Forberich, K., Fukuda, K., Guo, F., Hauch, J., Ho-Baillie, A. W. Y., Jacobsson, T. J., Janssen, R. A. J., Kirchartz, T., Loi, M. A., Mathew, X., Mitzi, D. B., Nazeeruddin, M. K., Paetzold, U. W., Rand, B. P., Rau, U., Someya, T., ... Brabec, C. J. (2023). *Device Performance of Emerging Photovoltaic Materials (Version 4)*. *Advanced Energy Materials - Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202303173>
- [2] Almora, O., Levchuk, J., These, A., Garcia-Belmonte, G., & Josef Matt, G. (2024). *Indoor Illumination Spectral Diversity Effects on Detailed Balance Efficiency Limit of Solar Cells*.
- [3] Almora, O., Vaillant-Roca, L., & Garcia-Belmonte, G. (2017). Perovskite Solar Cells: A brief Introduction and some Remarks. *Revista Cubana de Física*, 34(1), Article 1.
- [4] Almora Rodríguez, O. (2020). *Hysteresis and capacitive features of Perovskite Solar Cells* [Universitat Jaume I]. <https://open.fau.de/handle/openfau/13996>
- [5] Arduino. (2024a). *Guía de Referencia de Arduino*. [arduino.cc. https://www.arduino.cc/reference/es/](https://www.arduino.cc/reference/es/)
- [6] Arduino. (2024b, febrero 28). *Arduino UNO R3 datasheet*. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [7] Bakker, B. de. (2019a, febrero 2). Tutorial del sensor DHT11/DHT22 con Arduino (2 ejemplos). *Makerguides.com*. <https://www.makerguides.com/es/dht11-dht22-arduino-tutorial/>
- [8] Bakker, B. de. (2019b, septiembre 15). TM1637 Tutorial de Arduino de 4 dígitos y 7 segmentos (3 ejemplos). *Makerguides.com*. <https://www.makerguides.com/es/tm1637-arduino-tutorial/>
- [9] Cheich, M. (2021, mayo 25). *dtostrf()—Turn your floats into strings*. *Programming Electronics Academy*. <https://www.programmingelectronics.com/dtostrf/>
- [10] Jäger, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., van Swaaij, R., & Zeman, M. (2014). *Solar Energy. Fundamentals, Technology, and Systems*. https://web.kpi.kharkov.ua/ief/wp-content/uploads/sites/39/2020/05/solar_energy_1.pdf
- [11] Julien, A., Puel, J.-B., & Guillemoles, J.-F. (2022). Distinction of mechanisms causing experimental degradation of perovskite solar cells by simulating associated pathways. *Energy & Environmental Science*, 16(1), 190-200. <https://doi.org/10.1039/D2EE03377A>
- [12] Lighting Style. (s. f.). *The Ultimate Guide To Lighting Colour Temperature*. Lighting Style. Recuperado 16 de agosto de 2024, de <https://www.lightingstyle.com.au/guide-to-lighting-colour-temperature.html>
- [13] Liu, T. (s. f.). *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)*. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- [14] Lübke, D., Hartnagel, P., Angona, J., & Kirchartz, T. (2021). Comparing and Quantifying Indoor Performance of Organic Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 11(34), 2101474. <https://doi.org/10.1002/aenm.202101474>
- [15] National Instruments Corp. (2024). *¿Qué es NI LabVIEW?* <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>
- [16] ONREL. (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [17] Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2024). Renewable Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- [18] Roser, M. (2024). The world's energy problem. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/worlds-energy-problem>

- [19] RS. (s. f.). *Sensor de temperatura y humedad Seeed Studio—101020019, para usar con AM2302 Sensor / RS*. Recuperado 28 de julio de 2024, de <https://es.rs-online.com/web/p/kits-de-desarrollo-de-sensores/1845076?gb=s>
- [20] Samir, M., Almora, O., Sacramento, A., Pallarès, J., & Marsal, L. F. (s. f.). *A Facile Low Pre-Vacuum Treatment to Enhance the Durability of Non-Fullerene Organic Solar Cells*.
- [21] Sarah, K. E., Roland, U., & Ephraim N., O. (2020). A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *International Journal of Engineering Research and*, V9. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS070244>
- [22] Sensores e Instrumentación Guemisa S.L. (s. f.). *Sensores de humedad tipos y aplicaciones*. <https://guemisa.com/articulos/tutorial-humedad.pdf>
- [23] Thériault, O. (2015). *Analysis of the External Quantum Efficiency of Quantum Dot-enhanced Multijunction Solar Cells*. <https://doi.org/10.20381/RUOR-2748>
- [24] These, A., Koster, L. J. A., Brabec, C. J., & Le Corre, V. M. (2024). Beginner's Guide to Visual Analysis of Perovskite and Organic Solar Cell Current Density–Voltage Characteristics. *Advanced Energy Materials*, 14(21), 2400055. <https://doi.org/10.1002/aenm.202400055>
- [25] Titus, A. H., Cheung, M. C.-K., Chodavarapu, V. P., Titus, A. H., Cheung, M. C.-K., & Chodavarapu, V. P. (2011). CMOS Photodetectors. En *Photodiodes—World Activities in 2011*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/20194>