

MÁSTER EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR (AM0) EN CONCENTRADORES SOLARES BASADOS EN FIBRAS LUMINISCENTES



Estudiante: Urrutia Marañón, Eduardo

Directora: Illarramendi Leturia, María Asunción

Curso: <2022-2023>

Fecha: <Bilbao, 20, Septiembre, 2023>

Abstract

In this work, the effects of solar radiation outside earth's atmosphere have been studied experimentally for fluorescent fiber solar concentrators. The spectral intensity emitted by nine doped polymer optical fibers has been measured as a function of illuminated-length and/or time. The results were compared with those obtained using the same fibers under solar irradiation at the earth's surface. The fiber doped with Lumogen Red (1000 ppm) and the fiber co-doped with Lumogen Red and Yellow (500 500 ppm) have shown the best results, with an output power of 0.1 mW for an illuminated fiber length of 5 cm. Photostability studies of the codoped fiber under LEO cycles show that, when the fiber is not illuminated, the emitted intensity recovers relatively around 90 %.

Keywords: Polymeric Optic Fiber, Luminescent Solar concentrators, AM0 Radiation, LEO cycles.

Laburpena

Lan honetan, zuntz luminiszenteko eguzki-kontzentragailuetan eguzki-erradiazioak Lurreko atmosferatik kanpo dituen efektuak aztertu dira esperimentalki. Bederatzi dopatutako polimerozko zuntz optikok igorritako espektro-intentsitatea neurtu da, argizatutako luzeraren eta/edo denboraren menpe. Emaitzak Lurraren azalean eguzki-erradiaziopean zuntz berak erabiliz lortutakoekin konparatu dira. Emaitza onenak Lumogen Red-ekin dopatutako zuntzarekin (1000 ppm) eta Lumogen Red eta Yellow-ekin (500 500 ppm) batera dopatutako zuntzarekin lortu dira, 0.1 mW-eko potentzia lortuz 5 cm-ko luzera argizatuz. Kodopatutako zuntzaren fotoegonkortasunari buruzko azterketek LEO zikloi jarraituz erakusten dute, zuntza argizatuta ez dagoenean, igorritako intentsitatea erlatiboki % 90 berreskuratzen dela.

Gako-hitzak: Polimerzoko zuntz optikoak, eguzki-kontzentratzaile luminiszenteak, AM0 erradiazioa, LEO zikloak.

Resumen

En este trabajo se han estudiado experimentalmente los efectos de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre en concentradores solares de fibras luminiscentes. Se ha medido la intensidad espectral emitida por nueve fibras ópticas de polímero dopadas, en función de la longitud iluminada y/o del tiempo. Los resultados se han comparado con los obtenidos utilizando las mismas fibras bajo radiación solar en la superficie terrestre. Los mejores resultados se han obtenido con la fibra dopada con Lumogen Red (1000 ppm) y con la fibra codopada con Lumogen Red y Yellow (500 500 ppm), alcanzando los 0.1 mW de potencia para una longitud iluminada de 5 cm. Los estudios de fotoestabilidad de la fibra codopada siguiendo ciclos LEO, muestran que, cuando la fibra no está iluminada, la intensidad emitida se recupera relativamente alrededor de un 90 %.

Palabras clave: Fibras ópticas de polímero, Concentradores solares luminiscentes, Radiación AM0, Ciclos LEO.

Índice

Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	VIII
Lista de Acrónimos	VIII
1. Introducción	1
1.1. Concentradores solares	1
1.1.1. Concentradores solares luminiscentes	2
1.2. Concentradores Solares de Fibras Fluorescentes en el espacio	3
1.2.1. Caracterización de la radiación solar	4
1.2.2. Regiones orbitales	5
1.2.3. Condiciones ambientales orbitales	6
1.3. Objetivos	9
2. Metodología experimental	10
2.1. Calibración y puesta a punto del simulador solar AM0	10
2.2. Fibras caracterizadas	12
2.3. Medidas con los simuladores de radiación AM0 y AM1.5G	13
2.3.1. Medidas de la irradiancia espectral emitida	14
2.3.2. Ciclos de iluminación	16
2.4. Procesado de datos	18
2.4.1. Haciendo los datos manejables	18
2.4.2. Cálculo de la potencia total emitida	19
2.4.3. Cálculo de los momentos del espectro de emisión	19
2.4.4. Ajustes de funciones no lineales a los datos experimentales	20
2.4.5. Cálculo de errores	21
3. Resultados y Discusión	23
3.1. Resultados bajo radiación AM0: comparación	23
3.1.1. Longitud de onda media del espectro de emisión	23
3.1.2. Anchura espectral del espectro de emisión	23
3.1.3. Potencia total emitida	28
3.1.4. Fotoestabilidad	32
3.2. Ciclos LEO	39
4. Conclusiones	42
4.1. Líneas futuras de investigación	43
Referencias	44

Índice de figuras

1.	Gamasolar, instalación de GSC española en Sevilla.	2
2.	Representación del funcionamiento de los FFSC, tanto en conexión directa con la célula PV, como conectadas mediante una POF transparente [4]. . . .	3
3.	Irradiancia espectral frente a λ . (Amarillo) Espectro de radiación AM0; (Rojo) Espectro de radiación AM1.5G [9].	4
4.	Representación de las órbitas terrestres principales. (Negro) LEO; (Rojo) MEO; (Azul) GEO; y (Naranja) HEO.	6
5.	Representación de los cinturones de Van Allen y algunas órbitas relevantes [21].	8
6.	(a) Célula solar sobre la plataforma con la cuadrícula, a la misma altura que las fibras. (b) Primer plano del esquema de 9 puntos usado para la calibración.	10
7.	Primer plano del simulador solar donde se observan los cuatro tornillos blancos utilizados para reorientar la lámpara.	11
8.	Fotos del montaje experimental usado. (a) Primer plano de una fibra preparada para medir. (b) Vista general del montaje.	13
9.	(a) Dispositivo usado para el revestimiento. (b) Ejemplo del montaje con la fibra transparente. (Blanco) POF transparente, (Rosa) fibra dopada y (Rojo) unión <i>face to face</i>	14
10.	Montaje experimental final completo. (Negro) Unión <i>face to face</i> entre fibra dopada y POF transparente.	15
11.	(a) Primer plano de la fibra dopada unida mediante un conector SMA a la fibra de transporte. (b) Vista general del montaje experimental. (Rojo) AvaSpec-Mini; (Negro) Plataforma Arduino que controla la lámpara.	17
12.	Ejemplos de los archivos CSV proporcionados por AvaSoft 8. (a) CSV de una medida de irradiancia espectral. (b) CSV de una medida de fotoestabilidad. .	18
13.	Ejemplo del uso de la herramienta Solver para el ajuste de la Ec. (7) a los datos experimentales.	21
14.	Espectros de emisión de las fibras estudiadas bajo radiación AM0. (a) LV; (b) LY; (c) LO 1; (d) LO 2; (e) LR 1; (f) LR 2; (g) LR 3; (h) LR 4; (i) LRY . .	25
15.	λ_{avg} frente a longitud iluminada de fibra. Triángulos rojos: AM0; Puntos Azules: AM1.5G. (a) LV; (b) LY; (c) LO 1; (d) LO 2; (e) LR 1; (f) LR 2; (g) LR 3; (h) LR 4; (i) LRY	26
16.	Anchura espectral RMS frente a longitud iluminada de fibra. Triángulos rojos: AM0; Puntos Azules: AM1.5G. (a) LV; (b) LY; (c) LO 1; (d) LO 2; (e) LR 1; (f) LR 2; (g) LR 3; (h) LR 4; (i) LRY	27
17.	Potencias totales en μW emitidas por cada POF en función de z_e bajo ambos simuladores, AM0 y AM1.5G.	28
18.	Ratio entre la potencia emitida bajo radiación AM0 y la de AM1.5G en función de z_e	29
19.	Potencia emitida frente a z_e para condiciones de radiación AM0. Los puntos corresponden a los datos experimentales y las líneas continuas al ajuste de la Ec. (6) a los puntos experimentales.	30

20.	Potencia emitida frente a z_e para condiciones de radiación AM1.5G. Los puntos corresponden a los datos experimentales y las líneas continuas al ajuste de la Ec. (6) a los puntos experimentales.	31
21.	Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LR 4 bajo AM0. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 35°C, mientras que la ambiente era de 27°C.	33
22.	Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LRY bajo AM0. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 35°C, mientras que la ambiente era de 26.5°C.	34
23.	Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LR 4 bajo AM1.5G. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 34.5°C, mientras que la ambiente era de 27°C.	35
24.	Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LRY bajo AM1.5G. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 35°C, mientras que la ambiente era de 27°C.	36
25.	Intensidad normalizada en función del tiempo. (a) LR 4 bajo AM0; (b) LRY bajo AM0; (c) LR 4 bajo AM1.5G; (d) LRY bajo AM1.5G. $z_e=25$ mm y $z_{ne}=33$ mm. Los puntos azules corresponden a los datos experimentales y las líneas continuas a los ajustes de Ec. (7).	37
26.	Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LR 4 bajo ciclos LEO.	39
27.	Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LRY bajo ciclos LEO.	40
28.	Evolución temporal de la intensidad emitida bajo radiación AM0. (a) LR 4; (b) LRY. Puntos rojos: Ciclos LEO. Triángulos azules: Exposición continua.	41

Índice de tablas

1.	Voltajes (mV) registrados en la cuadrícula de 9 puntos para calibrar el simulador solar AM0.	11
2.	Intensidad en $W\ m^{-2}$ para los espectros experimentales y tabulados en el rango de 340 nm a 1100 nm junto con la relación entre ellas.	12
3.	Propiedades de las fibras usadas durante las mediciones.	12
4.	Características de las medidas con el simulador solar AM0. T_{int} : Cada cuanto tiempo toma AvaSoft 8 una medida; Avg.: El número de medidas que toma internamente para promediarlas y registrar una medida.	15
5.	Características de las medidas con el simulador solar AM1.5G. T_{int} : Cada cuanto tiempo toma AvaSoft 8 una medida; Avg.: El número de medidas que toma internamente para promediarlas y registrar una medida	16
6.	Características experimentales de las mediciones realizadas para el estudio de la fotoestabilidad de las fibras.	17
7.	Rangos espectrales utilizados para determinar la respuesta de las fibras dopadas.	19
8.	Factor de corrección empleado para cada fibra.	20
9.	Valores de los parámetros del ajuste de la potencia total usando la Ec. (6). R^2 es el coeficiente de determinación.	32
10.	Valores de los parámetros de los ajustes a las curvas de degradación temporal usando la Ec. (7). R^2 es el coeficiente de determinación de cada ajuste.	38

Lista de Acrónimos

POF - Polymeric Optic Fiber / Fibras Ópticas de Polímero
LSC - Luminescent Solar Concentrator / Concentrador Solar Luminescente
FFSC - Fluorescent Fiber Solar Concentrator / Concentrador Solar de Fibra Fluorescente
GSC - Geometric Solar Concentrators / Concentrador Solar Geométrico
AM - Air Mass / Masa de Aire
CME - Coronal Mass Ejection / Eyección de Masa Coronal
PMMA - Poly(methyl methacrylate) / Polimetilmetacrilato
PV - Photo Voltaic / Fotovoltaico
EM - Electromagnetic / Electromagnético
LEO - Low Earth Orbit / órbita Baja Terrestre
MEO - Medium Earth Orbit / órbita Media Terrestre
GEO - Geosynchronous Equatorial Orbits / órbita Geosíncrona Ecuatorial
HEO - High Elliptical Orbit / órbitas de Gran Elipticidad
ATOX - Atomic Oxygen / Oxígeno atómico
CSV - Comma Separated Values / Valores Separados por Comas
ISS - International Space Station / Estación Espacial Internacional

1. Introducción

Las energías renovables junto con el uso responsable de los recursos naturales presentes en nuestro planeta, son dos de los objetivos más importantes de la sociedad y ciencia modernas. En la Unión Europea, entre los años 2004 y 2021 se ha doblado el porcentaje de energía producida de manera renovable, alcanzando un total del 21 % en 2021 [1]. El compromiso de la Unión Europea va más allá, planteándose el objetivo de alcanzar la neutralidad climática para el año 2050. Por lo tanto, es palpable el interés en la investigación y en el desarrollo de tecnologías renovables, así como nuevas aplicaciones de las ya existentes.

Las energías renovables y la industria espacial han avanzado codo con codo desde la época de la carrera espacial entre los Estados Unidos y la Unión Soviética. Desde el uso de las primeras las células fotovoltaicas (PV) utilizadas en uno de los primeros satélites en orbitar la Tierra, el Vanguard I en 1958, hasta los últimos éxitos del proyecto MAPLE capaz de recoger la energía solar y transmitirla de manera inalámbrica hasta la superficie terrestre [2].

Actualmente, el coste de poner 1 kg de material en órbita alrededor de la Tierra es de unos 22000\$ [3]. Para poder aprovechar la energía del Sol, los satélites que orbitan la Tierra utilizan grandes superficies de paneles solares que suponen un gran impedimento económico. Por ello, la industria espacial suele ser la principal pionera e impulsora en el desarrollo y aplicación de energías renovables con el objetivo de recortar costes.

¿Y si se pudiese reducir el tamaño necesario de los paneles solares, reduciendo a su vez el peso y coste de los mismos?; ¿Y si se pudiese concentrar la radiación solar incidente en superficies más pequeñas sin perder eficiencia?; ¿Y si los paneles solares pudiesen ocultarse del daño causado por la radiación solar mediante dispositivos que transmitan la luz recogida hasta ellos, manteniendo así su máxima eficiencia?

Como se verá en la próxima sección, los concentradores solares no son un concepto nuevo, pero su viabilidad y aplicaciones, como el uso de Fibras Ópticas de Polímero (POF) como concentradores solares, se siguen investigando y comprobando a día de hoy.

1.1. Concentradores solares

El Sol lleva siendo una fuente de energía prometedora desde hace décadas y de entre las energías renovables, es la de mayor proyección de crecimiento. Se trata de una fuente prácticamente infinita de energía limpia y de gran intensidad, suministrando hasta 1000 W/m^2 en la superficie del ecuador terrestre en un día despejado. Con la intención de aprovechar la potencia del Sol, las células PV han estado en investigación y desarrollo activos desde hace más de 70 años. La mayor desventaja de las células PV es su eficiencia, lo que mantiene a la energía solar lejos de competir económicamente con otras fuentes de energía a pesar de sus avances. La baja eficiencia de las células provoca la necesidad de grandes áreas para la recolección de luz solar, lo que aumenta considerablemente los costes del sistema debido a la disponibilidad limitada del silicio puro refinado necesario para su fabricación. Otra disyuntiva, es la necesidad de un mecanismo y software de seguimiento y orientación para mantener el sistema siempre en la dirección óptima, manteniendo la eficiencia al máximo, lo que también hace aumentar los costes [4]. Los concentradores solares nacieron como respuesta a estos problemas, en los cuales la luz incidente se recoge y concentra a un área reducida

a través de diversos métodos con el objetivo de reducir los costes del sistema sin perder la potencia generada.

Uno de los métodos de concentración de energía solar son los Concentradores Solares Geométricos (GSC), donde espejos y lentes cubren grandes áreas focalizando la radiación incidente sobre las células PV que suelen encontrarse en el centro de la configuración (Figura 1). La mayor ventaja de los GSC es la capacidad de concentrar la luz incidente en áreas reducidas con altos valores de eficiencia y de generación de potencia, permitiendo a su vez la generación de potencia térmica debido a las altas temperaturas alcanzadas al concentrar radiación en áreas pequeñas [4]. Aún así, el sistema requiere de tecnología de seguimiento de alta precisión para que el sistema de espejos y lentes focalice correctamente sobre la célula PV ya que, pequeños errores en el alineamiento pueden provocar severas pérdidas de eficiencia. Sin embargo, los sistemas de GSC se utilizan en todo el mundo llegando en 2022 a los 23 países que generaron mega vatios de potencia de esta manera [5]. En España, contamos con el ejemplo de este tipo de instalación en el GSC Gemasolar en Sevilla [6].



Figura 1: Gemasolar, instalación de GSC española en Sevilla.

1.1.1. Concentradores solares luminiscentes

Otro método de concentrar la luz solar es mediante los Concentradores Solares Luminiscentes (LSC). En ellos, los materiales luminiscentes son insertados en guías de onda transparentes para absorber la luz solar y transportar la emisión generada mediante reflexión interna hasta la célula PV.

Los LSC tienen cuatro ventajas principales: (i) No necesitan un sistema de seguimiento para el Sol, ya que pueden absorber iluminación incluso cuando esta es difusa; (ii) Permiten el uso de células PV con respuestas espectrales optimizadas para aumentar su eficiencia, gracias a que diferentes materiales luminiscentes tienen sus espectros de absorción/emisión centrados en longitudes de onda distintas; (iii) Ayudan a solucionar los problemas de disipación de calor en las células solares debido a que estas están protegidas y ;(iv) Al utilizar materiales más baratos para recolectar y transmitir la luz y al permitir reducir el área requerida de célula PV, suponen un gran ahorro potencial. Uno de los motivos principales detrás del desarrollo de la tecnología LSC [4].

En cuanto a las desventajas, la principal es la dificultad en el cableado de la unión entre la capa activa del LSC y la célula PV. En respuesta a este problema se desarrollaron los Concentradores Solares de Fibra Fluorescente (FFSC), LSC cilíndricos basados en fibras ópticas de polímero dopadas.

En los FFSCs la POF dopada absorbe la luz solar incidente en su superficie, tanto directa como difusa, y propaga la fluorescencia generada a través de reflexión interna hasta la célula PV (Figura 2). Los FFSC ofrecen una gran flexibilidad que permite una sencilla manipulación, lo que ayuda con el cableado para la detección de la fluorescencia en la célula PV. Además, permiten unir fibras ópticas transparentes al borde de los FFSCs en conexiones *face to face*, por ejemplo, para transmitir la fluorescencia generada hasta las células solares. Esto permite la separación espacial entre el sistema que recoge la luz, los FFSCs y el sistema que la convierte en potencia eléctrica, es decir, las células PV. En aplicaciones espaciales, esto podría permitir ocultar los paneles solares para evitar su degradación y mantener su eficiencia al máximo posible, utilizando FFSC para recolectar la radiación incidente y transmitir la fluorescencia hasta el panel solar. Además, podría posibilitar la reducción del tamaño de los paneles solares debido a que la flexibilidad del cableado permitiría transportar toda la luz recibida a un área más pequeña [4].

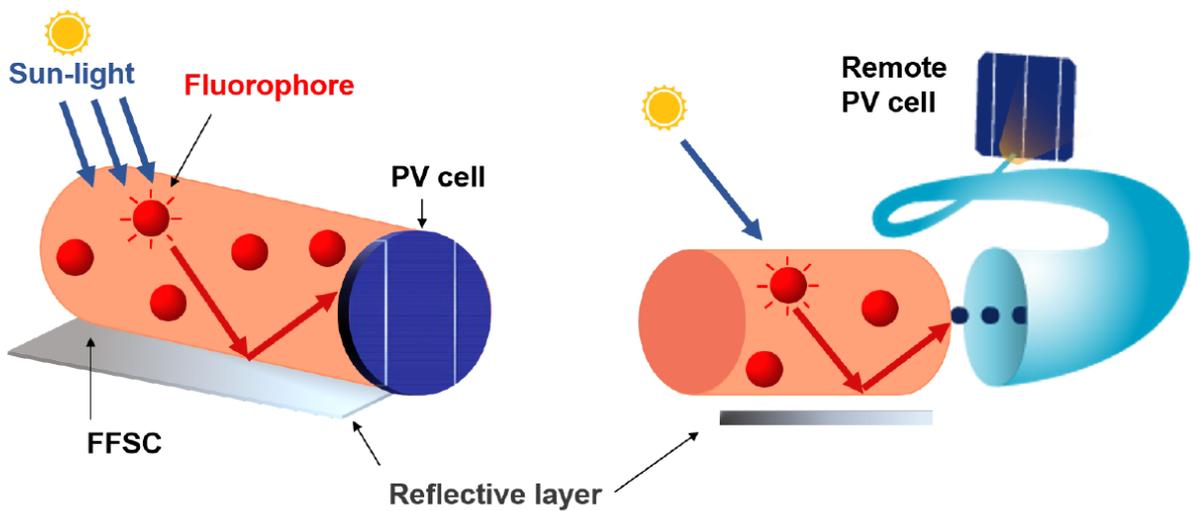


Figura 2: Representación del funcionamiento de los FFSC, tanto en conexión directa con la célula PV, como conectadas mediante una POF transparente [4].

1.2. Concentradores Solares de Fibras Fluorescentes en el espacio

La industria espacial ha demostrado su interés por los polímeros y los FFSC en diversos proyectos y experimentos, tanto para mejorar el ratio de potencia por kilogramo en órbita [7], como para estudiar la respuesta de distintos polímeros al entorno espacial [8]. En esta sección se explicará brevemente como se caracteriza la radiación solar y se introducirán las diferentes órbitas alrededor de la tierra junto con los riesgos que se pueden encontrar en ellas.

1.2.1. Caracterización de la radiación solar

Una Masa de Aire (AM) caracteriza la longitud del camino óptico directo de la radiación solar incidente a través de la atmósfera. Puede entenderse como una estimación de la cantidad de atmósfera que atraviesa la radiación solar incidente. Esta es la nomenclatura usada en el campo de las células solares y los sistemas de generación de potencia.

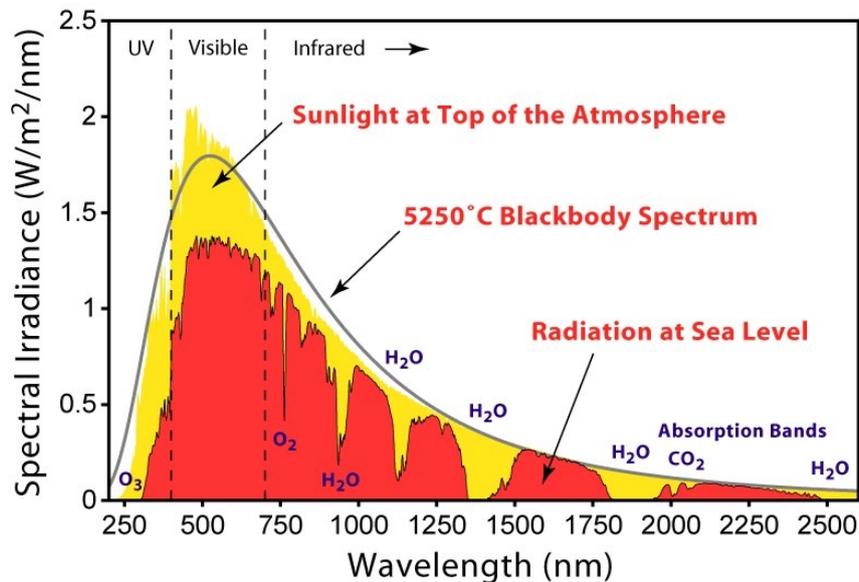


Figura 3: Irradiancia espectral frente a λ . (Amarillo) Espectro de radiación AM0; (Rojo) Espectro de radiación AM1.5G [9].

Radiación AM1.5G

AM1.5G se refiere a un grosor de 1.5 atmósferas y es el valor de referencia para representar la radiación media recibida anualmente en latitudes medias de la superficie terrestre. Se utiliza como estándar para la radiación a nivel del mar en todo el mundo. Su intensidad espectral está representada en la Figura 3

En el espectro de radiación AM1.5G pueden verse caídas que se corresponden con las bandas de absorción de los elementos más presentes en nuestra atmósfera, H₂O y CO₂. También puede observarse el efecto del ozono (O₃) en la parte izquierda del espectro, absorbiendo gran parte de la radiación ultravioleta (UV) que llega a la capa externa de la atmósfera. El valor de irradiancia total estándar para la radiación AM1.5G es de 1000 W/m² [10].

Radiación AM0

La radiación AM0 es la radiación incidente a la altura del exterior de la atmósfera terrestre con el espectro electromagnético (EM) completo emitido por el Sol. En este caso, la irradiancia estándar total adquiere un valor de 1367 W/m² [11], alrededor de un 35 % más que para AM1.5G, como puede verse en la Figura 3. El máximo de intensidad se encuentra en 500 nm aproximadamente, tanto para radiación AM0, como para AM1.5G.

1.2.2. Regiones orbitales

Para poder describir los distintos peligros potenciales que se pueden encontrar en las órbitas terrestres, se van a introducir las cuatro órbitas principales que los satélites y misiones usan alrededor de la Tierra junto con sus características principales (Figura 4):

- **LEO** - Las órbitas terrestres bajas (LEO) van desde los 200 km hasta los 2000 km sobre la superficie terrestre [12, 13]. Una de sus principales características es la presencia de las capas externas de la atmósfera, la termosfera y la exosfera, cuyos efectos se explicarán en la siguiente sección. Otra propiedad de las órbitas LEO, y la razón por la que es la más utilizada [14], es que debido a la baja altitud de los equipos orbitando en LEO permite comunicaciones con la superficie con muy baja latencia. En esta región orbital se encuentra la Estación Espacial Internacional a unos 400 km de la superficie terrestre.

En esta órbita, los satélites orbitan la Tierra a una velocidad entorno a 250 km/s, dando de 12 a 16 vueltas diariamente alrededor de la Tierra dependiendo de la altura de la órbita. Esto define los ciclos de iluminación que sufren los satélites al pasar en múltiples ocasiones por regiones de umbra, eclipse y penumbra con tiempos de sombra totales por órbita de hasta 35 minutos. Estos períodos de sombra están intercalados por alrededor de 60 minutos de iluminación, provocando que de media un satélite en una órbita LEO tarde 90 minutos en dar una vuelta a la Tierra. Los valores numéricos pueden variar dependiendo de la altura de la órbita sin embargo, los valores medios introducidos son los utilizados en diseños eléctricos como estándares [15].

- **MEO** - Las Órbitas Medias Terrestres (MEOs) agrupan todas las órbitas desde LEO hasta la órbita geoestacionaria, alrededor de 36000 km sobre la superficie. Debido a la presencia de los cinturones de radiación de Van Allen las órbitas MEO no son tan utilizadas como las LEO o las GEO [12]. Aun así, las órbitas MEO acogen uno de los tipos de satélite más importante, los sistemas de posicionamiento global como el GPS de NASA, GALILEO para la ESA y GLONASS para Roscosmos. En cuanto a las características de iluminación sobre los satélites, estas son muy similares a GEO con largos períodos de exposición constante intercaladas con temporadas de eclipses [15].
- **GEO** - Las Órbitas Geosíncronas Ecuatoriales (GEO), también llamadas órbitas geoestacionarias, se encuentran a una altura sobre la superficie terrestre de 35786 km y son la segunda órbita más usada alrededor de la Tierra [12]. En GEO, los satélites rotan junto con la Tierra de manera que siempre están apuntando a la misma región de la superficie. Para poder mantener su posición, los satélites rotan alrededor de la Tierra con la misma velocidad que esta gira sobre su propio eje, unos 1600 km/h en el ecuador. El hecho de que los satélites estén siempre sobre la misma región hace a las órbitas GEO sumamente atractivas para la industria de las telecomunicaciones.

Durante un año, los satélites en órbitas GEO sufren dos temporadas de eclipses de 45 días cada una, durante estos días las naves sufren eclipses diarios con duraciones que van desde los 20 minutos, al comienzo y final de la temporada, hasta los 72 minutos en los equinoccios. Durante el resto del año reciben radiación procedente del Sol de manera ininterrumpida [16].

- **HEO** - Las Órbitas de Gran Elipticidad (HEOs), o LEOs polares, representan alrededor de un 2% de las órbitas utilizadas por satélites en activo. Principalmente son empleadas para propósitos militares y por la agencia espacial Rusa, debido a que estas órbitas proporcionan cobertura en las latitudes altas ($> 80^\circ$) en las que otras órbitas fallan. Los satélites en órbitas HEO sufren largos períodos de exposición a la radiación solar como resultado de su gran excentricidad [15].

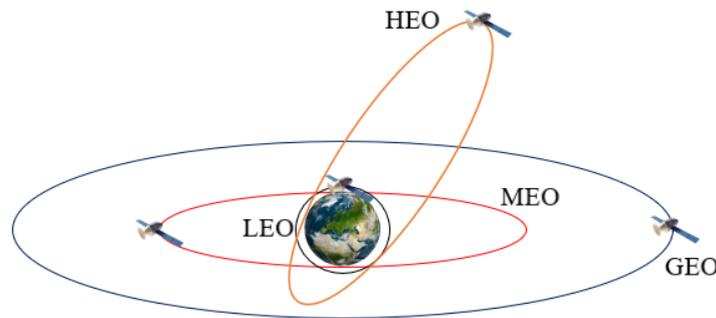


Figura 4: Representación de las órbitas terrestres principales. (Negro) LEO; (Rojo) MEO; (Azul) GEO; y (Naranja) HEO.

1.2.3. Condiciones ambientales orbitales

Una vez introducidas las diferentes órbitas terrestres, se va a hacer un breve repaso de los diferentes entornos dañinos y peligros que se pueden encontrar en ellas. Estas características del entorno espacial alrededor de nuestro planeta han sido estudiadas en profundidad durante décadas, dado que una mayor comprensión de las mismas facilita el desarrollo de nuevas tecnologías adaptadas al espacio.

Atmósfera Neutra

La fuente principal de la atmósfera neutra es la región superior de la atmósfera terrestre y los gases emitidos por la superficie de los propios satélites. Sus efectos principales son el rozamiento (*drag*) atmosférico, una fuerza que se opone al movimiento del satélite, y los efectos oxidantes del oxígeno atómico (ATOX) [12].

El *drag* atmosférico es una gran preocupación para las misiones en órbitas LEO, obligándolas a corregir su órbita constantemente lo que se traduce en un aumento del gasto de combustible o en la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías para contrarrestar sus efectos, tal como se realizó en la misión GOCE de la ESA [17].

El ATOX se genera mediante la interacción de la atmósfera superior con los rayos cósmicos provenientes del espacio. Las partículas de los rayos cósmicos, mayormente protones,

interactúan con el oxígeno molecular presente en las capas externas y lo disocian produciendo oxígeno atómico. Los satélites en órbitas bajas chocan con dichas partículas a velocidades medias de 8 km/s, lo que proporciona una energía de impacto de unos 5 eV, suficiente para romper los enlaces moleculares [12]. Debido a la baja densidad de moléculas en las capas externas de la atmósfera estas colisiones son poco frecuentes y únicamente son una preocupación real en órbitas LEO. Además, el ATOX puede dañar las superficies de polímeros afectando a sus propiedades ópticas, térmicas y mecánicas. Estos efectos suelen evitarse aplicando un revestimiento a los polímeros expuestos [18].

Entorno de plasma

El plasma conforma el 99 % de la materia bariónica, ordinaria, que se encuentra en el universo observable. Se trata de un gas neutro formado por partículas cargadas que cuenta con aproximadamente el mismo número de partículas cargadas positiva y negativamente. Debido a la interacción interna entre las partículas cargadas el plasma tiene una energía térmica de alrededor de 1 eV, de manera que el plasma se trata de un gas caliente y altamente ionizado [19].

Alrededor de la Tierra las fuentes de plasma que encontramos son la ionosfera, la magnetosfera y el viento solar, todas ellas producto de la interacción entre la radiación solar, la magnetosfera y las capas superiores de la atmósfera. El plasma causa fallos en sistemas eléctricos y de comunicaciones debido a que provoca cargas internas, es decir, acumulaciones de carga eléctrica en el interior del satélite. Los efectos del plasma son más relevantes en órbitas MEO y GEO donde dominan el entorno espacial la magnetosfera y el viento solar [12].

Entorno de radiación

En el espacio las fuentes de radiación son las partículas energéticas en movimiento, como iones, protones o electrones acelerados. Alrededor de la Tierra las fuentes de radiación se encuentran en los cinturones de Van Allen y en los rayos cósmicos provenientes del Sol.

Los cinturones de Van Allen (Figura 5) son estructuras tridimensionales alrededor de la Tierra donde las partículas cargadas son aceleradas a lo largo de las líneas cerradas del campo magnético terrestre generando radiación.

Los rayos cósmicos se originan en las erupciones solares, los eventos magnéticos más potentes de nuestro sistema solar, generando radiación que engloba todo el espectro EM. Estas erupciones solares y las Eyecciones de Masa Coronal (CME) son la fuente de las partículas de alta energía que quedan atrapadas en las líneas del campo magnético terrestre y que pueblan el medio interplanetario de nuestro sistema solar [20].

Los efectos principales de la radiación y las partículas energéticas son la sobrecarga y el deterioro de sistemas internos ya que pueden penetrar la superficie de los satélites además de poder degradar los materiales superficiales, mediante la ruptura de enlaces moleculares. En órbitas LEO el entorno de radiación está dominado por la anomalía del Atlántico Sur, en la cual la diferencia entre los ejes de rotación y magnético de la Tierra provocan que las líneas de campo magnético se encuentren más cerca de la superficie, permitiendo a la

radiación incidente penetrar más. En las órbitas MEO la mayor fuente de radiación son los cinturones de Van Allen y en GEO son los rayos cósmicos provocados por las CME.

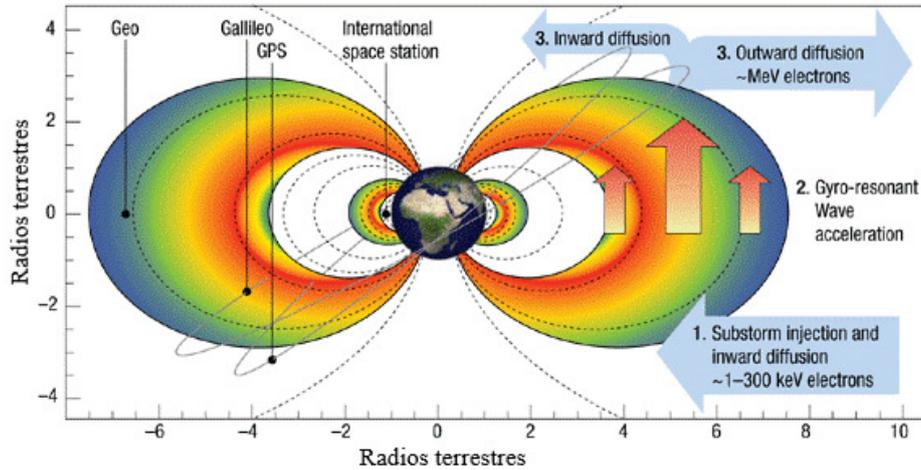


Figura 5: Representación de los cinturones de Van Allen y algunas órbitas relevantes [21].

Entorno de temperatura

Los satélites en el espacio se encuentran en un entorno de vacío, esto provoca que los únicos mecanismos de transporte de calor sea mediante transmisión de energía y radiación EM. Las fuentes principales de radiación EM alrededor de la Tierra son: La radiación proveniente del Sol, la radiación solar reflejada en la superficie terrestre (caracterizada por el albedo terrestre) y la radiación infrarroja emitida por la propia Tierra debido a su temperatura [12].

Los ciclos de temperatura característicos para las órbitas LEO van típicamente desde los -100°C hasta los 95°C . Como se ha mencionado previamente, los satélites en órbitas LEO recorren umbra, eclipse y penumbra rápidamente (unos 35 minutos) por lo que los gradientes de temperatura que sufren son pronunciados y suceden a menudo. Los satélites deben ser diseñados para soportar las deformaciones y vibraciones térmicas resultantes ya que diferentes materiales se estrecharán o expandirán a distintos ritmos. En el caso de los polímeros, estos pueden sufrir delaminaciones, estrés térmico y deterioros en sus propiedades mecánicas debido a estos ciclos térmicos [18]. En MEO y GEO, los gradientes son menos pronunciados debido a que los períodos de eclipse son más largos. Los rangos de temperatura en estas órbitas van de los -180°C hasta unos pocos grados Celsius [12].

Meteoroides y basura espacial

Los cometas son pequeños cuerpos extraterrestres formados por rocas y elementos ligeros congelados como el agua. Suelen tener órbitas elípticas alrededor del Sol con períodos

que van desde unas decenas de años hasta los cientos de años. Al aproximarse al Sol, comienzan un proceso de desgasificación donde el polvo y gas generado crea una cola llamada coma. Cuando los cometas pasan cerca de la Tierra algunas de sus rocas y partículas quedan atrapadas por la esfera de influencia terrestre, estos cuerpos son los que se conocen como meteoroides. Junto a los meteoroides, la basura espacial provoca que la cuenta de pequeños cuerpos potencialmente peligrosos para las misiones en órbita terrestre llegue al orden de millones. Desde que la actividad espacial empezó hace aproximadamente 60 años con el lanzamiento del Sputnik, miles de lanzamientos y misiones han llenado inexorablemente de pequeños restos de material la región espacial en el entorno de nuestro planeta. A día de hoy, de los 29000 objetos bajo seguimiento activo de la red de vigilancia estadounidense solamente unos 4000 son satélites operacionales, el resto se consideran riesgos potenciales [22].

El mayor peligro de estos pequeños cuerpos es el daño estructural que pueden provocar al impactar. Estos daños varían desde efectos superficiales (objetos pequeños <5 cm), como deteriorar propiedades superficiales ópticas y térmicas, hasta perforar y despresurizar el satélite dejándolo inservible y generando más basura espacial (objetos grandes >10 cm) [11].

Vacío

Una vez la presión atmosférica llega a valores despreciables a la altura de la línea de Kármán ($z=100$ km), puede considerarse que el satélite se encuentra en un entorno de vacío. Las condiciones de vacío provocan la evaporación de volátiles poliméricos y la evaporación y sublimación de componentes molecularmente ligeros [18]. Estudios en polímeros de uso común en la industria espacial, muestran que la desgasificación de volátiles poliméricos no tiene efectos graves. Su aspecto más peligroso es que son tóxicos para astronautas presentes en misiones tripuladas, algo que es sencillo de evitar una vez conocido. También se mostró que las POFs son los polímeros menos afectados mostrando una pérdida de masa total de menos de 0.3% en 24 horas [18].

1.3. Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo han sido los siguientes:

- Calibrar y poner a punto un nuevo simulador de radiación AM0.
- Entender y reproducir el proceso experimental de trabajo con las POFs bajo condiciones AM1.5G y aplicarlo a condiciones AM0, mejorando el proceso dónde fuese posible.
- Procesar los datos obtenidos y lograr información sobre la potencia total emitida, la evolución del espectro de emisión y la fotoestabilidad de las fibras dopadas.
- Caracterizar las fibras bajo ambos simuladores para poder realizar un análisis comparativo de los resultados.
- Caracterizar las fibras someténdolas a ciclos de radiación característicos de las órbitas LEO.

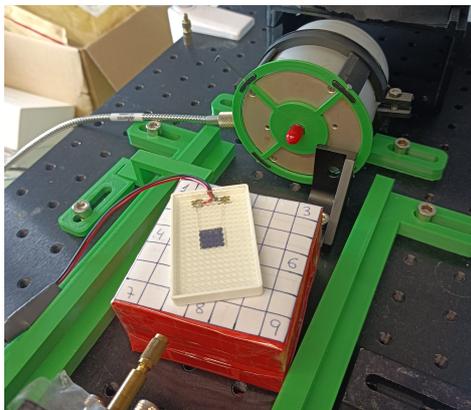
2. Metodología experimental

Las medidas experimentales se han realizado en el laboratorio del grupo de Fotónica Aplicada de la UPV/EHU. El grupo suministró las fibras dopadas para ser caracterizadas bajo radiación AM0, fuera de la atmósfera terrestre.

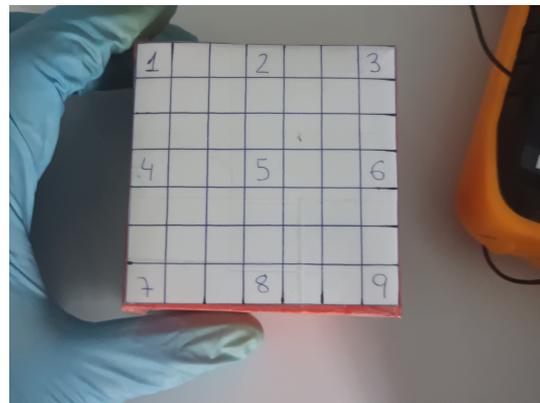
2.1. Calibración y puesta a punto del simulador solar AM0

La primera tarea que se llevó a cabo fue asegurarse de que el simulador SunLite de Abet Technologies proporcionaba correctamente las propiedades de la radiación AM0. Para ello, se usó una célula solar calibrada de 1 cm^2 para medir la intensidad de radiación mediante un voltímetro. En relación a los valores estándar presentados en la sección 1.2.1 y debido a la respuesta lineal de la célula solar, los valores esperados de intensidad eran de 100 mV para radiación AM1.5G y de 137 mV para condiciones de AM0. Además de la célula solar, se utilizó un coseno corrector para medir la intensidad espectral en todas direcciones.

Las lámparas de los simuladores solares iluminan un área aproximada de 5 cm^2 . Para medir la intensidad recibida en todo el área se usó el esquema de 9 puntos, que forma un cuadrado de 5 cm^2 , que puede verse en la Figura 6 (b). La plataforma roja (Figura 6a) donde se encuentra la cuadrícula con los nueve puntos tiene una altura tal, que la célula solar apoyada encima está a la altura a la que se encontraría una fibra durante las medidas. De esta forma, la calibración de la intensidad se realizó a la altura donde se colocarán las fibras dopadas a analizar.



(a)



(b)

Figura 6: (a) Célula solar sobre la plataforma con la cuadrícula, a la misma altura que las fibras. (b) Primer plano del esquema de 9 puntos usado para la calibración.

Primero se midió la intensidad en el punto 5 de la cuadrícula, ajustando la altura de la lámpara hasta obtener 100 mV y 137 mV en la célula solar, valores esperados para radiación AM1.5G y AM0 respectivamente. En cada caso, se registró el espectro de emisión de la lámpara con el coseno corrector. Con el espectro se calculó la integral en el rango de emisión de la lámpara para compararla con los valores teóricos de 1000 W/m^2 para radiación AM1.5G y 1367 W/m^2 para la de AM0. Los valores calculados eran un 25 % y un 15 % menores para AM1.5G y AM0, respectivamente. Que ambos valores muestren una disminución se debe a

que los valores teóricos son calculados tomando todo el espectro electromagnético, mientras que el sistema de detección utilizado está limitado a un rango de longitudes de onda reducido (340 - 1100 nm). La diferencia en intensidad de un 10 % entre simuladores es producto de la mayor contribución que tiene la región UV del espectro en AM0 (Figura 3).

Con el objetivo de iluminar todo el área de 5 cm² de manera uniforme se pasó a medir la intensidad en los nueve puntos de la cuadrícula. Para cambiar la orientación de la lámpara se utilizaron los tornillos blancos mostrados en la Figura 7.

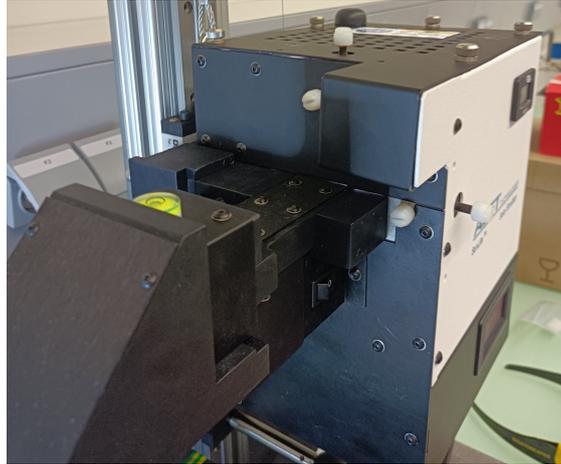


Figura 7: Primer plano del simulador solar donde se observan los cuatro tornillos blancos utilizados para reorientar la lámpara.

Los valores finales de intensidad registrados en la célula solar calibrada para los 9 puntos de la cuadrícula, se encuentran en la Tabla 1. En la región central, marcada por los puntos 2, 5 y 8, donde irán las fibras durante las medidas, se registraron valores muy próximos a 137 mV (radiación AM0), mientras que hacia los bordes de la cuadrícula la intensidad decrecía. Tras terminar la calibración se registró el número mostrado en el simulador con la altura a la que proporcionaba las condiciones de radiación AM0.

(1)	(2)	(3)
124	132	121
(4)	(5)	(6)
130	137	123
(7)	(8)	(9)
122	136	132

Tabla 1: Voltajes (mV) registrados en la cuadrícula de 9 puntos para calibrar el simulador solar AM0.

Para comprobar la calibración se midieron los espectros de emisión con el coseno corrector. Con estos espectros se volvió a calcular la integral para compararla con los valores teóricos. Los valores teóricos se calcularon usando los valores tabulados para el espectro de AM1.5G y AM0 (Anexo I) para poder hacer la integral en el mismo rango en ambos casos. Los cálculos se realizaron usando el rango espectral de la lámpara que va desde 340 nm a

1100 nm aproximadamente. También se comprobó la relación entre ambas radiaciones, que tiene un valor teórico de 1.35.

	AM0	AM1.5G	Relación AM0/AM1.5G
Experimental	1009.53	743.13	1.36
Teórico	1048	774.8	1.35

Tabla 2: Intensidad en $W m^{-2}$ para los espectros experimentales y tabulados en el rango de 340 nm a 1100 nm junto con la relación entre ellas.

Ambos valores experimentales (Tabla 2) muestran una diferencia respecto a sus valores teóricos esperados de menos de un 5 %. Además, la relación entre intensidades experimentales es prácticamente la esperada, de manera que la calibración de ambos simuladores puede considerarse correcta.

2.2. Fibras caracterizadas

Las POFs usadas a lo largo de este trabajo son fibras ópticas de polímero dopadas con colorantes Lumogen creadas por el grupo de Fotónica Aplicada en colaboración con el instituto de polímeros del CSIC. Las fibras están compuestas de una matriz polimérica transparente y un colorante dopante. La matriz es el Polimetilmetacrilato (PMMA) y los colorantes son compuestos orgánicos basados en perileno con distintas concentraciones. Las características de las POFs estudiadas durante este trabajo se muestran en la Tabla 3. La diferencia entre las fibras LR 1 y LR 3, y LR 2 y LR 4 es su fecha de fabricación, con LR 3 y LR 4 habiendo sido fabricadas en el último año utilizando un método de fabricación mejorado. LRY, la fibra dopada con dos colorantes, comparte este método mejorado ya que también es una fibra de fabricación reciente. Cada colorante tiene un espectro de absorción centrado en longitudes de onda diferentes por lo que estudiarlas ha permitido una mejor caracterización espectral de las respuestas de las POFs a la radiación AM0 y AM1.5G.

Código de fibra	Colorante	Concentración (ppm)	Diámetro (mm)
LV	Lumogen F Violet 570	1000	0.92±0.01
LY	Lumogen F Yellow 083	1000	0.98±0.02
LO 1	Lumogen F Orange 240	500	0.94±0.02
LO 2	Lumogen F Orange 240	1000	0.96±0.02
LR 1	Lumogen F Red 305	500	0.96±0.02
LR 2	Lumogen F Red 305	1000	1.02±0.01
LR 3	Lumogen F Red 305	500	0.95±0.01
LR 4	Lumogen F Red 305	1000	0.99±0.01
LRY	Lumogen F Red 305, Lumogen F Yellow 083	500 500	1±0.01

Tabla 3: Propiedades de las fibras usadas durante las mediciones.

2.3. Medidas con los simuladores de radiación AM0 y AM1.5G

Como se ha mencionado anteriormente, los simuladores fueron calibrados para iluminar las fibras dopadas con una intensidad total de 1370 W/m^2 para radiación AM0 y 1000 W/m^2 para radiación AM1.5G. Las fibras fueron colocadas sobre la línea central del área de incidencia de la luz, marcada por los puntos 2, 5 y 8 (Figura 6).

Antes de ser colocadas, las POFs se pulieron y limpiaron. Para pulirlas se usaron dos lijas de diferente rugosidad. La más rugosa para pulir las imperfecciones más visibles y la más suave para terminar de alisar el resto de imperfecciones de la superficie. Se utilizó un objetivo de 20x para asegurarse de que la superficie estaba siendo correctamente pulida. Tras pulir, las fibras se limpiaron con isopropanol para eliminar la suciedad y posibles restos del pulido. Una vez preparadas, las fibras se conectaban a un conector SMA para colocarlas bajo el simulador.

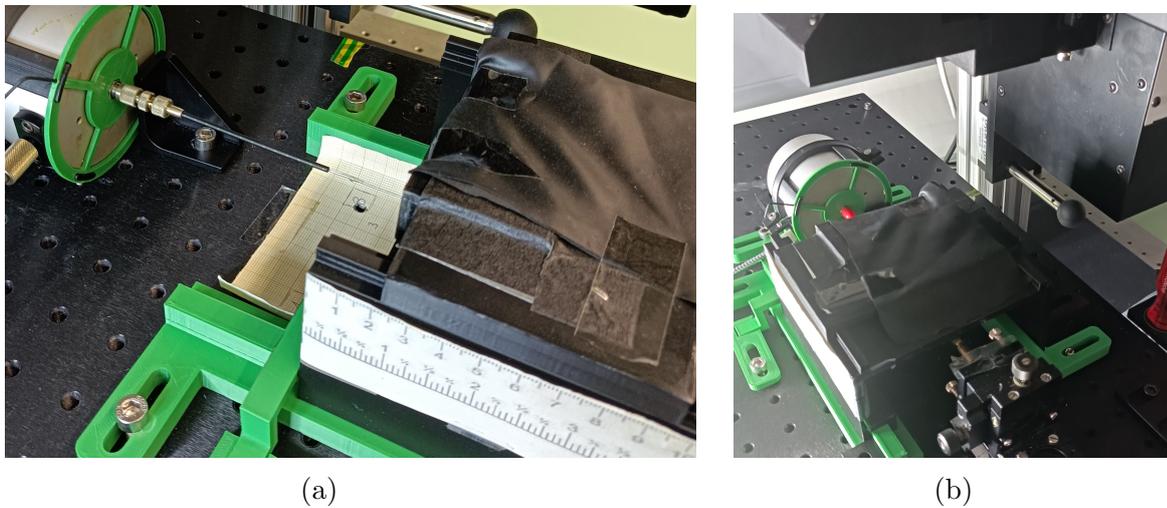


Figura 8: Fotos del montaje experimental usado. (a) Primer plano de una fibra preparada para medir. (b) Vista general del montaje.

En la Figura 8 puede observarse un ejemplo del montaje experimental usado durante el trabajo. La mayoría de piezas usadas para la estructura son piezas impresas con la impresora 3D del grupo Applied Photonics. Las piezas verdes sirven de estructura de soporte tanto para la esfera integradora, como para el resto de las piezas. Sobre ellas puede verse otra estructura de piezas negras también hechas con la impresora 3D. Estas piezas negras forman la estructura que regula la iluminación incidente sobre la fibra. La parte superior puede desplazarse libremente por unos carriles con una regla unida a su lateral que permite medir la longitud de fibra iluminada (z_e) con precisión milimétrica (Figura 8a). En la Figura 8b, puede verse cómo la lámpara ilumina la fibra de manera perpendicular.

La descripción de los distintos detectores empleados se llevará a cabo en las próximas secciones. El software utilizado para la medida de la intensidad espectral calibrada y los espectros de emisión fue AvaSoft 8, un programa de Avantes. Una herramienta fácil de usar que permite la toma manual de medidas y cuenta con herramientas para preparar medidas automatizadas.

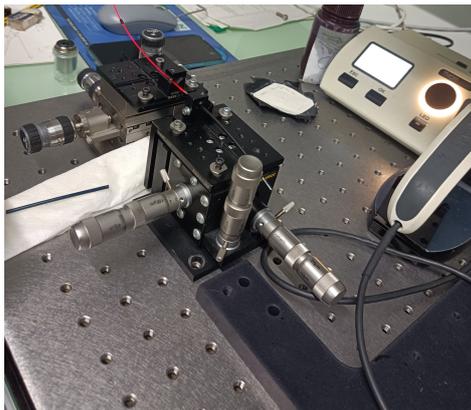
2.3.1. Medidas de la irradiancia espectral emitida

Las primeras medidas realizadas fueron de la potencia emitida por las fibras en ambos simuladores solares. Durante esta sección se presentarán los diferentes montajes experimentales utilizados y los ajustes realizados para obtener las medidas más precisas posibles.

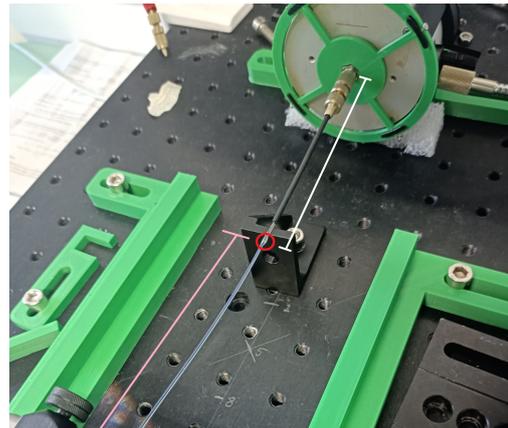
La esfera integradora (Figura 8b) usada fue la Avasphere-50-IRRAD. Este dispositivo es una cavidad esférica hueca cuyo interior está recubierto de una capa difusa blanca reflectora. La luz que emite la fibra es captada en su totalidad por la esfera integradora a través de una abertura circular de un milímetro de diámetro. Una vez en el interior, la luz se refleja en las paredes siendo dispersada de manera difusa. A la salida de la esfera integradora una fibra transparente lleva la luz hasta el espectrómetro. En las medidas donde se usó la esfera integradora el espectrómetro utilizado fue el espectrómetro calibrado AvaSpec-ULS2048 con una resolución de 1 nm. El uso de la esfera integradora, al captar esta toda la luz emitida por la fibra, permitió realizar medidas absolutas determinando así la potencia total emitida por la fibra.

La fibra pulida y limpia se conectó a través de un conector SMA a la esfera integradora (Figura 8a). El otro extremo de la POF se conectó a una estructura metálica a la misma altura que la entrada de la esfera integradora mediante otro conector SMA (Figura 8b). Tras ajustar ambos conectores, con cuidado de no dañar la fibra, la fibra quedaba tensa y horizontal. En todas las medidas donde un conector SMA se utiliza para unir la POF a la esfera integradora existe siempre una longitud de fibra no iluminada (z_{ne}) de 3.3 cm correspondiente a la longitud del SMA.

Para comparar las medidas de manera más efectiva entre simuladores se utilizó otra forma de conectar la fibra dopada con la esfera integradora. En vez de a un conector SMA, la fibra dopada se unió a una POF transparente para que transportase la luz hasta la esfera integradora, haciendo que $z_{ne} = 0$. La fibra transparente se unió a la fibra dopada mediante un revestimiento polimérico secado bajo iluminación UV en una unión *face to face* (Figura 9b).



(a)



(b)

Figura 9: (a) Dispositivo usado para el revestimiento. (b) Ejemplo del montaje con la fibra transparente. (Blanco) POF transparente, (Rosa) fibra dopada y (Rojo) unión *face to face*.

Para mejorar este montaje se diseñó e imprimió otra pieza negra con la intención de bloquear la luz que iluminaba la unión entre fibra dopada y POF transparente y parte de ésta (Figura 10). Por tanto, el montaje experimental utilizado para medir la irradiancia espectral emitida por las fibras está constituido por la fibra dopada unida a una POF transparente que lleva la luz a la esfera integradora, junto con una estructura de piezas negras opacas que aseguran que z_{ne} sea cero y que la fibra transparente no sea iluminada.

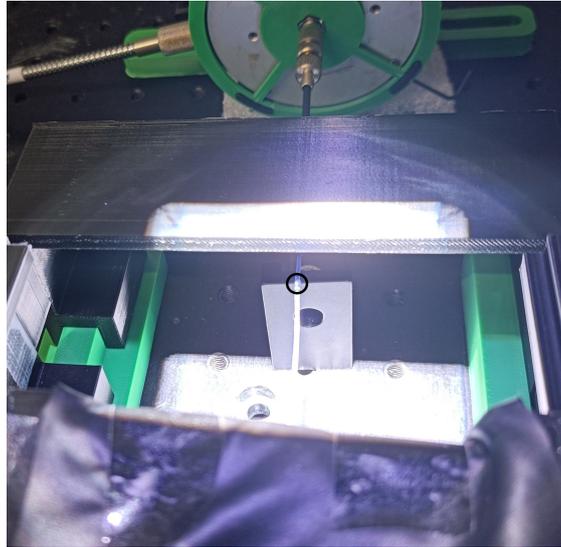


Figura 10: Montaje experimental final completo. (Negro) Unión *face to face* entre fibra dopada y POF transparente.

En las Tablas 4 y 5 se recogen algunas de las características con las que se realizaron las medidas de irradiancia espectral para las fibras dopadas expuestas en la Tabla 3.

Código de fibra	Sim.	z_{ne} (cm)	Tiempo int. (s)	Avg.	Max (mm)	z_e
LV	AM0	0	1	1	50	
LY	AM0	0	1	1	50	
LO 1	AM0	0	0.61	1	50	
LO 2	AM0	0	0.491	2	50	
LR 1	AM0	0	0.491	2	50	
LR 2	AM0	0	0.491	2	50	
LR 3	AM0	0	0.491	2	50	
LR 4	AM0	0	0.491	2	50	
LR Y	AM0	0	0.491	2	50	

Tabla 4: Características de las medidas con el simulador solar AM0. T_{int} : Cada cuanto tiempo toma AvaSoft 8 una medida; Avg.: El número de medidas que toma internamente para promediarlas y registrar una medida.

Código de fibra	Sim.	z_{ne} (cm)	tiempo int. (s)	Avg.	Max (mm)	z_e
LV	AM1.5G	0	1.5	1	50	
LY	AM1.5G	0	1.5	1	50	
LO 1	AM1.5G	0	1.04	1	50	
LO 2	AM1.5G	0	0.826	1	50	
LR 1	AM1.5G	0	0.826	1	50	
LR 2	AM1.5G	0	0.826	1	50	
LR 3	AM1.5G	0	0.826	1	50	
LR 4	AM1.5G	0	0.826	1	50	
LRY	AM1.5G	0	0.826	1	50	

Tabla 5: Características de las medidas con el simulador solar AM1.5G. T_{int} : Cada cuanto tiempo toma AvaSoft 8 una medida; Avg.: El número de medidas que toma internamente para promediarlas y registrar una medida

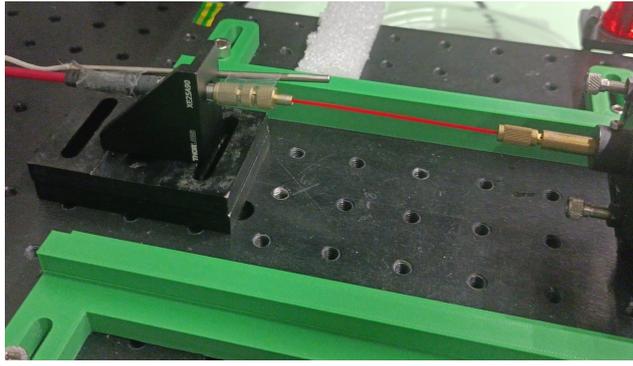
2.3.2. Ciclos de iluminación

Para estudiar la fotoestabilidad de las fibras dopadas se diseñaron varios experimentos simulando condiciones de iluminación diversas que sufren los satélites orbitando la Tierra. Estos experimentos fueron adaptados a las limitaciones para controlar la iluminación y a la disponibilidad de instrumentación en el laboratorio de investigación.

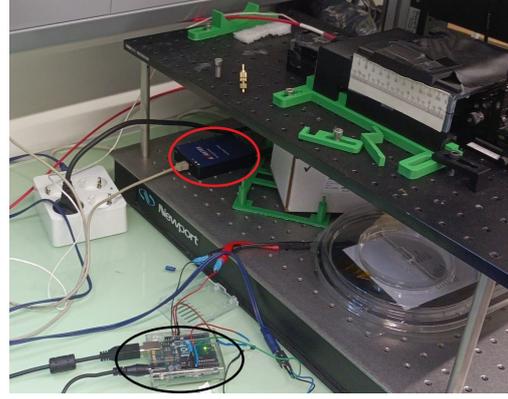
- Para simular los ciclos de iluminación de las órbitas LEO, se diseñó un experimento de 24 horas donde se intercalaban intervalos de iluminación de 60 minutos e intervalos de sombra de 33 minutos. La elección de estos tiempos concretos la motivó el hecho de ser los períodos de luz y sombra en el exterior de la ISS, donde se llevan a cabo este tipo de experimentos [8].
- Para las órbitas GEO, MEO y HEO se preparó un experimento para simular los largos períodos de exposición a la radiación solar que sufren los satélites en estas órbitas. Para ello se estudió la respuesta de las fibras dopadas durante 3 días de iluminación ininterrumpida.

Debido a la naturaleza de estos experimentos no se dispuso de tiempo para estudiar las 9 fibras mostradas en la Tabla 3. Se eligieron dos, las que mostraban los resultados más prometedores, Lumogen Red 1000 (LR 4) y Lumogen Red Yellow 500 500 (LRY).

El montaje experimental para este tipo de mediciones puede verse en la Figura 11. La fibra dopada se conecta mediante un conector SMA a una fibra transparente (Figura 11a) que lleva la luz hasta el espectrómetro directamente. El espectrómetro usado en estas medidas fue el AvaSpec-Mini de Avantes que también tiene una resolución de 1 nm (Figura 11b). En este caso, no se recoge toda la luz que sale de la fibra por lo que las medidas no son absolutas. Las medidas absolutas no son necesarias para estudiar la fotoestabilidad de las fibras ya que no se requiere calcular la potencia total emitida, sino cómo varía la emisión con el tiempo.



(a)



(b)

Figura 11: (a) Primer plano de la fibra dopada unida mediante un conector SMA a la fibra de transporte. (b) Vista general del montaje experimental. (Rojo) AvaSpec-Mini; (Negro) Plataforma Arduino que controla la lámpara.

Para poder realizar los ciclos de iluminación y poder controlar la lámpara de manera remota se utilizó una plataforma Arduino (Figura 11b). Mediante el uso de esta plataforma y el software de Avantes se pudieron programar las medidas para realizarlas de manera remota. Junto a la fibra dopada se colocó un termopar (Figura 11a) para medir la temperatura de la fibra durante las medidas. Las medidas del termopar pudieron programarse a través del programa EasyLog USB para ser recogidas junto con las de las fibras.

En la Tabla 6 se exhiben las características de las mediciones durante los ciclos LEO y los estudios de fotoestabilidad de 3 días. Debido a la gran sensibilidad del espectrómetro AvaSpec-Mini, se utilizaron tiempos de integración pequeños con grandes *averaging* para evitar la saturación del detector.

Código de fibra	Sim.	z_e (mm)	z_{ne} (cm)	Iluminación (min)	Sombra (min)	Duración total(h)
LR 4	AM0	25	3.3	60	33	24
LR Y	AM0	25	3.3	4320	0	72
LR Y	AM0	25	3.3	60	33	24
LR 4	AM0	23	3.3	4320	0	72
LR 4	AM1.5G	25	3.3	4320	0	72
LR Y	AM1.5G	25	3.3	4320	0	72
LR 4	AM1.5G	25	3.3	4320	0	72
LR 4	AM0	20	3.3	4320	0	72

Tabla 6: Características experimentales de las mediciones realizadas para el estudio de la fotoestabilidad de las fibras.

2.4. Procesado de datos

Para el procesado de los datos, las herramientas principales utilizadas fueron Python, en particular la librería pandas, y el programa Excel. Ambos programas se complementan al poder utilizar *dataframes* en Python para convertir las mediciones en archivos compatibles con Excel fácilmente y así, poder realizar gráficas en tiempo real.

2.4.1. Haciendo los datos manejables

Avasoft 8 proporciona las medidas en un archivo de texto formateado con valores separados por comas (CSV). A través de la librería pandas de Python, los archivos CSV pueden ser tratados como *dataframes* lo que permite obtener los datos de las columnas deseadas directamente sin tener que preocuparse de leer el archivo entero.

1301038U1: Bloc de notas					1611089M1_22jun.23_123123_0001.Rwd8: Bloc de notas				
Archivo Edición Formato Ver Ayuda					Archivo Edición Formato Ver Ayuda				
Integration time [ms]: 491,451					Integration time [ms]: 1,050				
Averaging Nr. [scans]: 1					Averaging Nr. [scans]: 100				
Smoothing Nr. [pixels]: 0					Smoothing Nr. [pixels]: 0				
Data measured with spectrometer [name]: 1301038U1					Data measured with spectrometer [name]: 1611089M1				
Wave [nm]	Sample [counts]	Dark [counts]	Reference [counts]	Absolute Irradiance [$\mu\text{Watt}/\text{cm}^2/\text{nm}$]	Wave [nm]	Sample [counts]	Dark [counts]	Reference [counts]	Scope Corrected for Dark [counts]
326,10;	40,000;	70,000;	0,000;	-0,01189;-0,00032	340,73;	9,292;	6,562;	0,000;	2,72973
326,70;	-108,000;	-55,000;	0,000;	0,00000; 0,00000	341,34;	-2,659;	-1,175;	0,000;	-1,48429
327,30;	38,000;	14,000;	0,000;	0,00601; 0,00016	341,94;	2,501;	-4,384;	0,000;	6,88492
327,90;	-384,000;	-430,000;	0,000;	0,02441; 0,00067	342,55;	1,332;	5,184;	0,000;	-3,85205
328,50;	93,000;	45,000;	0,000;	0,01975; 0,00054	343,16;	4,011;	7,078;	0,000;	-3,06718
329,10;	-346,000;	-419,000;	0,000;	0,03478; 0,00096	343,77;	3,431;	1,244;	0,000;	2,18722
329,70;	109,000;	141,000;	0,000;	-0,00932;-0,00026	344,37;	4,581;	5,575;	0,000;	-0,99385
330,30;	-89,000;	-39,000;	0,000;	-0,03345;-0,00092	344,98;	2,643;	4,709;	0,000;	-2,06563
330,90;	347,000;	144,000;	0,000;	0,06757; 0,00187	345,59;	4,650;	-8,530;	0,000;	13,18036
331,50;	353,000;	337,000;	0,000;	0,00490; 0,00014	346,20;	-6,159;	5,137;	0,000;	-11,29675
332,10;	522,000;	231,000;	0,000;	0,12112; 0,00336	346,80;	7,052;	2,254;	0,000;	4,79772
332,70;	189,000;	59,000;	0,000;	0,09818; 0,00273	347,41;	1,192;	-3,077;	0,000;	4,26830
333,30;	85,000;	-33,000;	0,000;	0,33989; 0,00947	348,02;	2,152;	2,061;	0,000;	0,09080
333,90;	-352,000;	-268,000;	0,000;	-0,04489;-0,00125					
334,50;	-218,000;	-183,000;	0,000;	-0,01746;-0,00049					
335,10;	-75,000;	-268,000;	0,000;	0,09001; 0,00252					

Figura 12: Ejemplos de los archivos CSV proporcionados por AvaSoft 8. (a) CSV de una medida de irradiancia espectral. (b) CSV de una medida de fotoestabilidad.

De los datos proporcionados por AvaSoft 8 para cada medida (Figura 12) los utilizados para los análisis posteriores fueron la longitud de onda, columna [0] y la irradiancia espectral absoluta (Figura 12a) y el campo con el *dark* corregido (Figura 12b), siendo en ambos casos la columna [4].

Para las medidas de irradiancia espectral emitida se tenían diez CSVs por fibra y simulador. De cara a trabajar con estos datos, se creó un *script* de Python que recogía los datos necesarios, los formateaba correctamente y creaba un archivo Excel. La razón de crear archivos de Excel en vez de trabajar directamente en Python, fue la posibilidad de ir creando gráficos en tiempo real para comprobar que los macros creados en Excel hacían los cálculos correctamente.

En el caso de los estudios de fotoestabilidad se trabajó directamente en Python debido a la comodidad de realizar todo en un mismo entorno. Todos los *scripts* de Python utilizados en este trabajo están accesibles en el Anexo II.

2.4.2. Cálculo de la potencia total emitida

El cálculo de la potencia total emitida para cada fibra se hace a través de la irradiancia espectral absoluta ($I(\lambda)$) dada por AvaSoft 8 (Figura 12a). La irradiancia total, I_{out} , se calcula mediante la expresión:

$$I_{out} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

A la hora de realizar las integrales numéricamente se usó el método del trapecio porque se puede implementar fácilmente tanto en Excel como en Python. Las integrales se calculan de la siguiente manera:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda = \frac{\Delta\lambda}{2} \cdot (I_1(\lambda) + 2I_2(\lambda) + \dots + 2I_{n-1}(\lambda) + I_n(\lambda)) \quad ; \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\#pasos} \quad (2)$$

Al plantear la integral es importante determinar el rango en el que esta va a realizarse (λ_1, λ_2). Los rangos óptimos para el cálculo de las integrales determinados para cada colorante pueden verse en la Tabla 7.

Colorante	λ_1 (nm)	λ_2 (nm)
Violeta	400	645
Amarillo	481	752
Naranja	520	740
Rojo	571	792
Rojo Amarillo	576	804

Tabla 7: Rangos espectrales utilizados para determinar la respuesta de las fibras dopadas.

Para el cálculo de la irradiancia absoluta final se utilizó un factor de normalización donde se tenía en cuenta los diferentes diámetros de las fibras dopadas y el diámetro del orificio de entrada de la esfera integradora (Tabla 8). La potencia total emitida se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_{out} = I_{out} \cdot A_{out} \cdot f_{corr} = I_{out} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot f_{corr} \quad (3)$$

2.4.3. Cálculo de los momentos del espectro de emisión

Además de la potencia total emitida por las fibras también se caracterizó la evolución de los espectros de emisión. Para ello, se calcularon la longitud de onda media de las curvas y sus anchuras espectrales RMS.

Código de fibra	Diámetro (mm)	f_{corr}
	0.5	277.48
LV	0.92	82.18
	0.93	80.42
LO 1	0.94	78.73
LR 3	0.95	77.11
LO 2; LR 1	0.96	75.49
	0.97	73.98
LY	0.98	72.46
LR 4	0.99	71.03
LRY	1	69.60
	1.01	68.00
LR 2	1.02	67.00
	1.03	65.62

Tabla 8: Factor de corrección empleado para cada fibra.

Primer momento

Para una distribución espectral el primer momento proporciona la longitud de onda media del espectro o λ_{avg} . El 1^{er} momento del espectro de emisión, de aquí en adelante λ_{avg} , se calcula según la expresión:

$$\lambda_{avg} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \cdot \lambda d\lambda}{I_{out}} \quad (4)$$

Segundo momento

El segundo momento (σ_{rms}^2) está relacionado con la anchura espectral del espectro de emisión. Durante este trabajo ha sido de interés la media cuadrática (RMS) de la anchura espectral (σ_{rms}) ya que caracteriza el ensanchamiento o estrechamiento del espectro. En lo sucesivo se hará referencia a ella como anchura espectral RMS o anchura espectral. El cálculo del segundo momento se realiza mediante la ecuación:

$$\sigma_{rms}^2 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \cdot (\lambda - \lambda_{avg})^2}{I_{out}} \quad (5)$$

2.4.4. Ajustes de funciones no lineales a los datos experimentales

La evolución de la potencia total emitida, P_{out} , en función de la longitud de fibra dopada iluminada puede ser derivada de las *rate equations* que describen los procesos ópticos que ocurren en las fibras [4]. Cuando domina el proceso de fluorescencia en condiciones estacionarias, puede obtenerse una expresión sencilla que describe la dependencia de P_{out} con z_e . Un dominio de la fluorescencia se refiere al régimen en el cual las pérdidas ópticas, como reabsorción o scattering, superan a las ganancias. La expresión para $P_{out}(z_e)$ es la

siguiente [4]:

$$P(z_e) = P_{sat}(1 - \exp(-C \cdot z_e)) \quad (6)$$

donde P_{sat} es la potencia de saturación y C es una constante relacionada con la atenuación promedio de la fibra.

Para el análisis de la evolución de la señal emitida en las mediciones de fotoestabilidad se realizó un ajuste a una doble exponencial:

$$I(t) = A \cdot \exp(-t/\tau_A) + B \cdot \exp(-t/\tau_B) + C \quad (7)$$

dónde τ_A y τ_B son los tiempos que describen la degradación a largo y corto plazo respectivamente. Mientras que A , B y C son parámetros libres para mejorar el ajuste.

Tanto (6) como (7) se tratan de ecuaciones no lineales por lo que requieren de herramientas específicas para realizar los ajustes. Durante este trabajo se ha utilizado la herramienta Solver de Excel para este propósito. Solver permite minimizar $\sum(f(x)_{exp.} - f(x)_{ajuste})^2$ (Mínimos cuadrados), variando los parámetros a determinar mediante métodos no lineales.

Por otro lado, haciendo uso de la función de Excel para calcular el coeficiente de correlación entre dos grupos de datos, se calculó el coeficiente de determinación. Mediante el coeficiente de determinación (R^2) se puede estimar cuán óptimo es el ajuste realizado a los valores experimentales, siendo $R^2 = 1$ un ajuste perfecto.

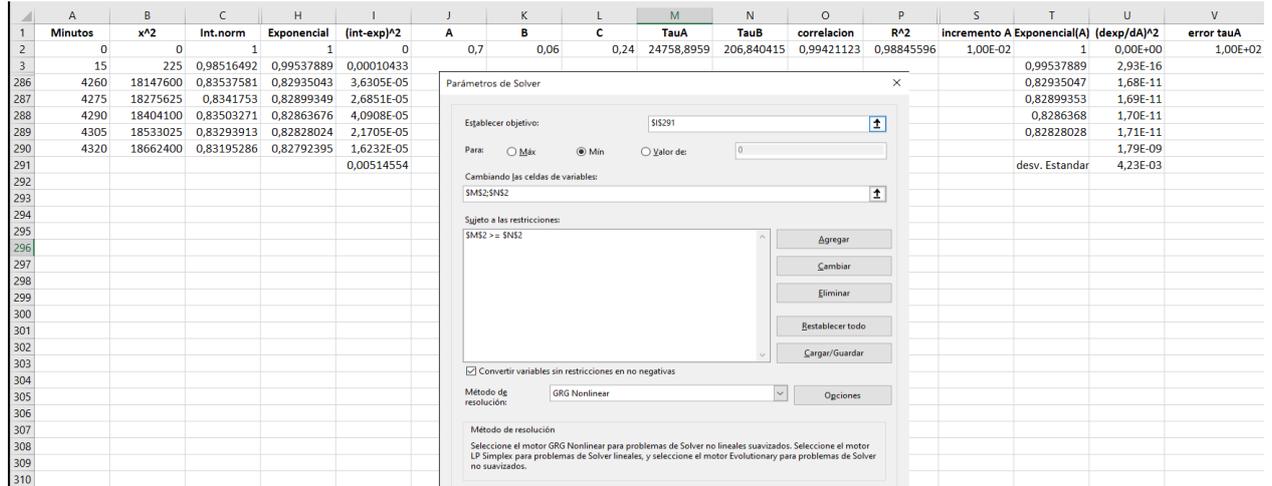


Figura 13: Ejemplo del uso de la herramienta Solver para el ajuste de la Ec. (7) a los datos experimentales.

2.4.5. Cálculo de errores

Los errores derivados de los ajustes a los datos experimentales, se calcularon mediante la desviación estándar entre el valor experimental y el valor calculado en el ajuste. La expresión utilizada para el cálculo de errores fue la siguiente:

$$\Delta a = \sqrt{\sum \left(\frac{(f_{exp} - f_{ajuste})^2}{N - 1} \right)} \frac{1}{\sqrt{\sum \left(\frac{df}{da} \right)^2}} \quad (8)$$

El primer término de la Ec. (8) es la desviación estándar entre los valores experimentales y los del ajuste, con N siendo el número total de entradas de datos. En la Ec. (8) a es, tanto el parámetro que se está variando para hacer el ajuste, como la cantidad para la que se está determinando el error. Para tener esto en cuenta se introduce la raíz cuadrada de la suma sobre los cuadrados de la derivada de f_{ajuste} con respecto a a en el denominador del segundo término de la Ec. (8). Las sumas, cuadrados y raíces presentes en la Ec. (8) son sencillos de calcular en Excel mediante las operaciones entre columnas y la herramienta autosuma. Para el cálculo de la derivada se creó una columna adicional para $f(a + \text{incremento})$ (Figura 13) y después se utilizó una aproximación numérica a la definición matemática de derivada.

3. Resultados y Discusión

A lo largo de esta sección se presentarán los resultados principales obtenidos en este trabajo. El orden seguido será primero presentar los resultados que pueden compararse entre ambos simuladores solares y terminar la sección exponiendo los resultados para los ciclos LEO.

3.1. Resultados bajo radiación AM0: comparación

Primero, se presentarán los resultados relativos a la evolución con z_e de la longitud de onda media y la anchura espectral RMS. Después, se discutirán los resultados relacionados con la potencia total emitida por las fibras. Finalmente, se detallarán los resultados del estudio de la fotoestabilidad en las fibras LR 4 y LRY. Los espectros de emisión obtenidos bajo radiación AM0 para todas las fibras dopadas pueden verse en la Figura 14.

3.1.1. Longitud de onda media del espectro de emisión

En la Figura 15 se muestra la evolución de las longitudes de onda media del espectro de emisión en función de la longitud de fibra dopada iluminada para las dos radiaciones, AM0 y AM1.5G. Los comportamientos más generales observados, a excepción de el de LV, son un *red-shift* de la longitud de onda media junto una tendencia a la saturación a medida que aumenta z_e . Un *red-shift* significa que λ_{avg} se desplaza a longitudes de onda más largas. El rango de desplazamiento observado es similar para todas las fibras (excepto LV) mostrando un incremento de entre 8 a 12 nm desde $z_e = 5$ mm hasta $z_e = 50$ mm. No se ha observado una diferencia significativa en el comportamiento y los valores de λ_{avg} registrados bajo AM0 y AM1.5G.

El *red-shift* observado es resultado de un fenómeno conocido como reabsorción, que aumenta tanto con z_e , cómo con z_{ne} . Los materiales tienen espectros diferenciados de emisión y de absorción. Cuando ambos espectros se solapan puede suceder que un fotón emitido por el material sea absorbido por sí mismo para luego ser re-emitido. Esta reabsorción en la región solapada con la emisión (λ cortas) hace que su longitud de onda de emisión aumente, desplazándose hacia el rojo.

Para LV (Figura 15a) se observa claramente que no sigue la tendencia de las demás. Parece sufrir un *blue-shift*, esto es, un desplazamiento de su λ_{avg} hacía longitudes de onda más cortas. Este efecto podría ser resultado de la degradación de la fibra. Como se mostrará en la sección de la fotoestabilidad, cuando las fibras se degradan sufren un pequeño *blue-shift* en su λ_{avg} debido a la ruptura de moléculas en la fibra dopada. El motivo por el que sólo LV muestre signos de *blue-shift* en las medidas de emisión podría estar relacionado con que su espectro de absorción está centrado más cerca de la región UV del espectro EM, la zona del espectro que más afecta a la degradación.

3.1.2. Anchura espectral del espectro de emisión

En la Figura 16 se presenta la evolución de la anchura espectral RMS frente a la longitud de fibra iluminada. Bajo ambas radiaciones se observa un comportamiento similar en

todas las fibras estudiadas. A medida que z_e crece, la anchura espectral disminuye y muestra signos de saturación. Los valores del estrechamiento para la anchura espectral no muestran diferencias entre ambas radiaciones. El estrechamiento en todos los casos, se encuentra entre los 8 y 10 nm.

Los valores de anchura espectral obtenidos bajo ambas radiaciones son similares, estando la diferencia relativa entre ellos dentro del rango de error experimental. La única fibra que muestra un comportamiento diferente es la fibra codopada LRY, en la que $(\sigma_{rms})_{AM0} > (\sigma_{rms})_{AM1,5G}$ para todos los valores de z_e .

Espectros de emision bajo radiación AM0

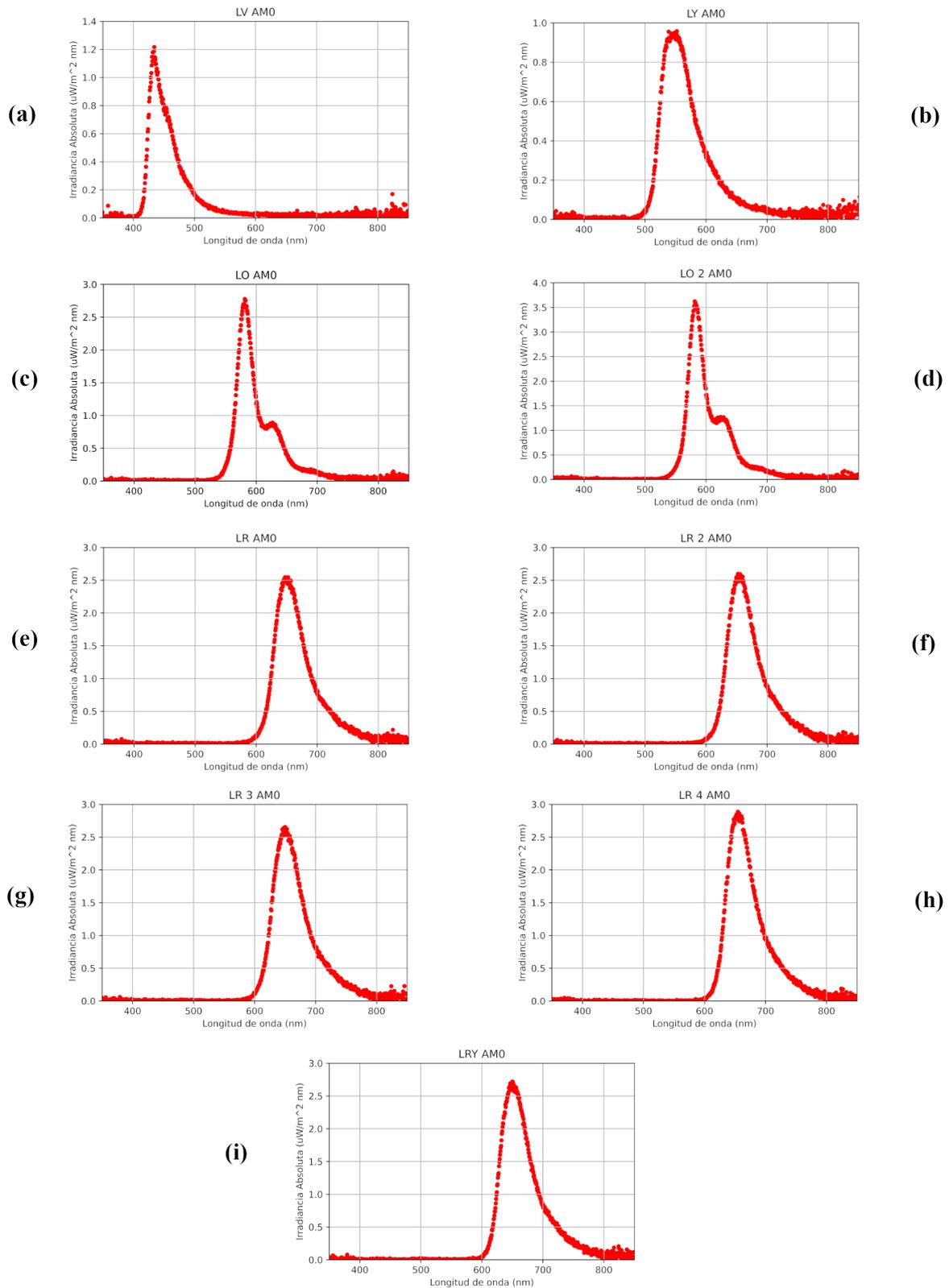


Figura 14: Espectros de emision de las fibras estudiadas bajo radiación AM0. (a) LV; (b) LY; (c) LO 1; (d) LO 2; (e) LR 1; (f) LR 2; (g) LR 3; (h) LR 4; (i) LRY

Longitud de onda media

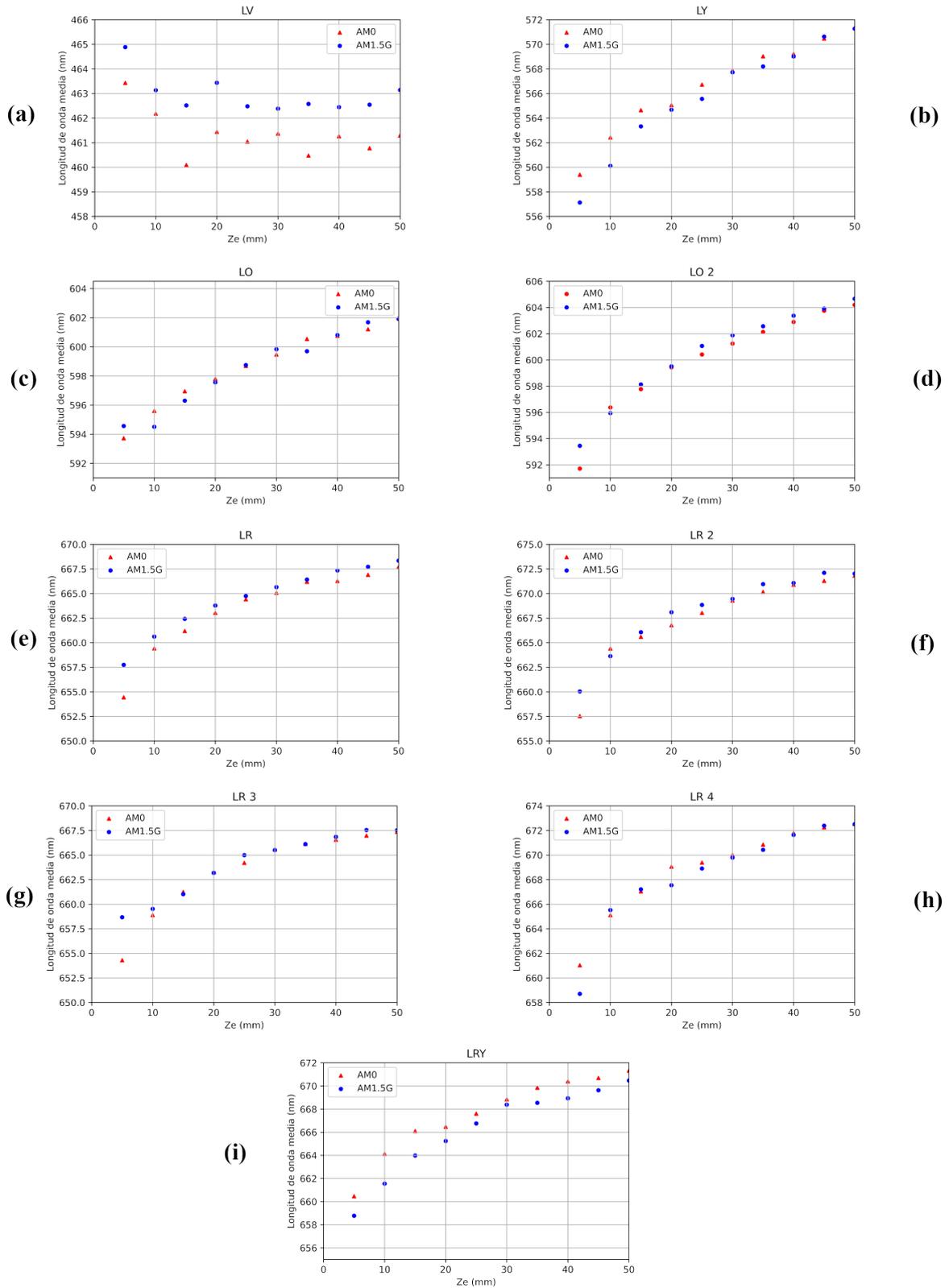


Figura 15: λ_{avg} frente a longitud iluminada de fibra. Triángulos rojos: AM0; Puntos Azules: AM1.5G. (a) LV; (b) LY; (c) LO 1; (d) LO 2; (e) LR 1; (f) LR 2; (g) LR 3; (h) LR 4; (i) LRY

Anchura espectral

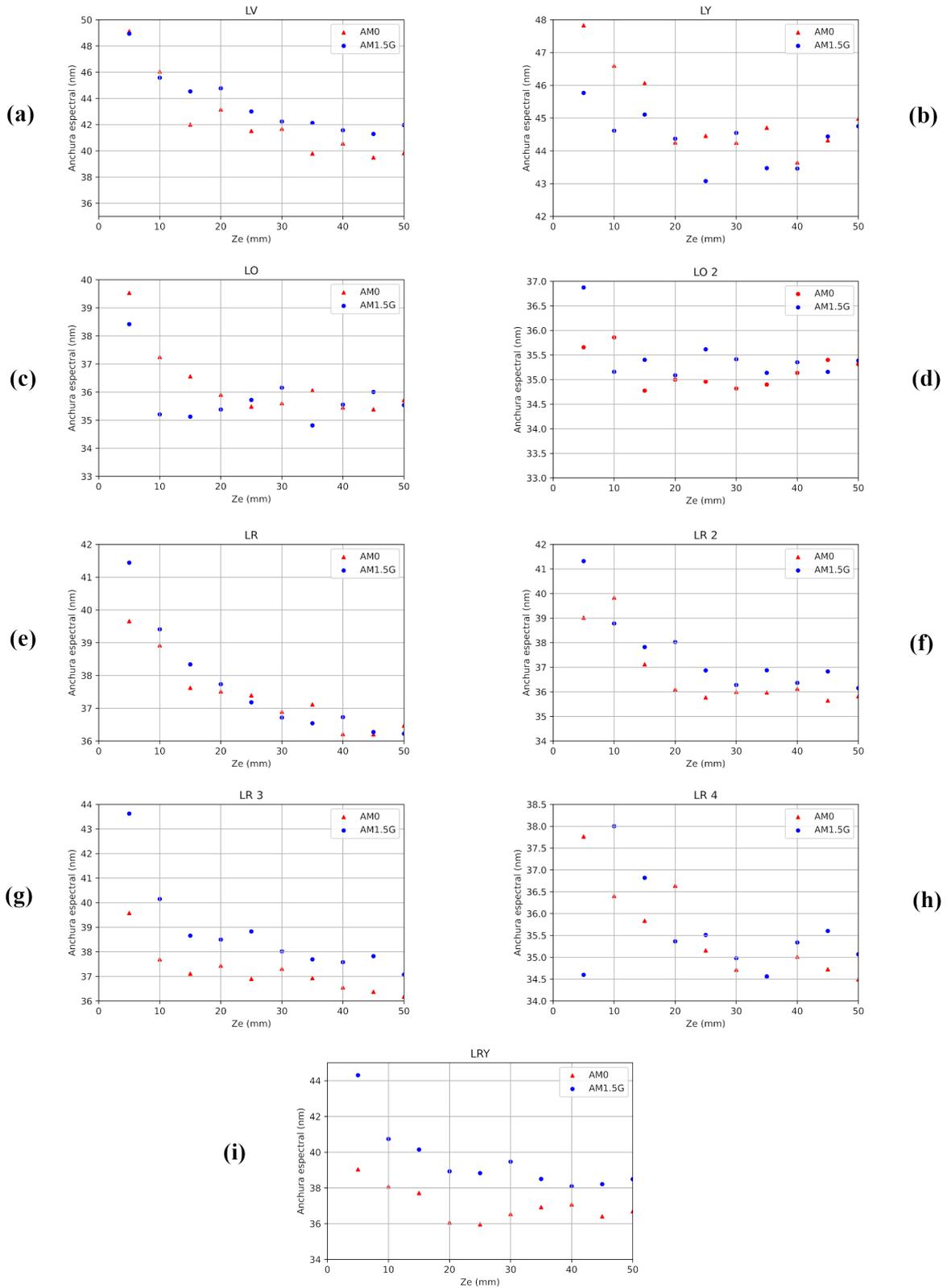


Figura 16: Anchura espectral RMS frente a longitud iluminada de fibra. Triángulos rojos: AM0; Puntos Azules: AM1.5G. (a) LV; (b) LY; (c) LO 1; (d) LO 2; (e) LR 1; (f) LR 2; (g) LR 3; (h) LR 4; (i) LRY

3.1.3. Potencia total emitida

La potencia total emitida por las fibras dopadas en μW se ha obtenido usando la Ec. (3). Los resultados numéricos se presentan en la Figura 17 en función de la longitud excitada de fibra. Para cada fibra se tienen 2 filas, la superior correspondiente a los valores obtenidos con la radiación AM0 y la inferior para los valores bajo AM1.5G. Por otro lado, en la Figura 18 se recogen los valores de los ratios entre esas potencias totales frente a z_e .

Código de Fibra \ z_e (mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	Simulador
LV	5,90	11,00	15,18	18,80	21,71	24,13	26,02	28,03	29,43	30,92	AM0
	3,53	5,37	7,73	9,65	11,02	12,13	13,43	14,38	15,40	16,37	AM1.5
LY	9,71	15,71	20,57	24,03	27,95	31,12	33,79	36,08	38,53	40,50	AM0
	4,80	8,03	11,24	13,66	15,90	18,11	20,01	21,48	23,26	24,42	AM1.5
LO	14,63	26,61	36,14	44,28	51,65	57,52	62,78	66,70	69,83	73,82	AM0
	11,38	19,74	26,79	33,14	38,90	43,50	47,53	51,00	54,19	57,17	AM1.5
LO 2	18,53	37,10	49,61	60,92	69,19	76,80	83,78	88,84	94,51	98,47	AM0
	11,38	19,74	26,79	33,14	38,89	43,49	47,52	50,99	54,19	57,17	AM1.5
LR	18,83	33,17	44,25	54,59	63,89	71,55	78,98	84,66	90,42	96,42	AM0
	13,84	22,99	30,49	37,05	43,38	49,29	54,54	60,05	64,23	68,82	AM1.5
LR 2	16,31	32,56	45,58	55,85	65,03	73,30	81,45	86,59	91,06	95,37	AM0
	11,20	19,91	27,71	34,14	39,96	44,89	49,59	52,65	56,62	58,84	AM1.5
LR 3	18,44	35,80	48,73	58,94	69,08	77,70	83,86	89,62	94,80	99,71	AM0
	16,68	23,52	30,90	38,37	45,10	50,63	54,64	59,21	63,18	66,01	AM1.5
LR 4	15,62	32,52	45,27	55,95	64,95	73,58	82,33	90,20	96,07	102,46	AM0
	11,25	21,36	29,17	34,79	41,07	46,89	51,64	57,16	61,40	64,65	AM1.5
LRY	13,45	31,02	45,79	56,21	66,78	74,98	82,90	88,90	94,62	100,45	AM0
	13,32	23,10	31,49	39,19	46,31	52,85	56,49	60,98	64,91	68,93	AM1.5

Figura 17: Potencias totales en μW emitidas por cada POF en función de z_e bajo ambos simuladores, AM0 y AM1.5G.

LV muestra el mayor aumento en potencia total emitida al pasar de utilizar el simulador AM1.5G al AM0. Esto puede ser por el aumento de intensidad en la región UV del espectro de la radiación AM0 (Figura 3). Como puede verse en las Figuras 14 y 15, la respuesta de LV esta centrada alrededor de los 460 nm siendo por tanto, la fibra más sensible en el rango UV de entre todas las caracterizadas. Aunque la potencia de LV bajo AM0 casi dobla a la de AM1.5G, la potencia total recogida es la más baja de todas las fibras estudiadas, con un valor de $31 \mu\text{W}$ para $z_e = 50 \text{ mm}$ (Figura 17).

Las fibras dopadas muestran un aumento en el ratio entre potencias cuando aumenta la concentración de dopante en la fibra. LO (500 ppm) muestra un ratio de ≈ 1.3 mientras que LO 2 (1000 ppm) exhibe uno de ≈ 1.7 , siendo en principio la única diferencia entre estas dos fibras la concentración de dopante. Entre las fibras LR y LR2 también se aprecia un aumento del ratio al aumentar la concentración de dopante. El mayor aumento de ratio observado para LO y LO 2 puede deberse a que estas fibras tienen su rango espectral más cerca del máximo de intensidad del espectro solar (Figura 3) que las fibras LR.

En la Figura 18 también puede observarse una ligera dependencia del ratio entre potencias con z_e , un decrecimiento del ratio a medida que la distancia iluminada aumenta. El ratio entre potencias también muestra una cierta dependencia con λ_{avg} , disminuyendo cuando λ_{avg} va en aumento. LV ($\lambda_{avg} \approx 460\text{nm}$) muestra un ratio de 1.89, LY ($\lambda_{avg} \approx 560\text{nm}$) uno de 1.66, LO 2 ($\lambda_{avg} \approx 600\text{nm}$) uno de 1.72, para LR 4 ($\lambda_{avg} \approx 666\text{nm}$) se recoge uno de 1,58 y para LRY ($\lambda_{avg} \approx 670\text{nm}$) se tiene 1.46. No se aprecia una diferencia significativa entre las fibras de fabricación reciente, LR 3 y LR 4, y las fibras con mismo dopante y concentración más antiguas, LR1 y LR 2.

Volviendo a la Figura 17, las POFs dopadas que mostraron una mayor potencia total

Código de Fibra \ Z_e (mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
LV	1,67	2,05	1,96	1,95	1,97	1,99	1,94	1,95	1,91	1,89
LY	2,02	1,96	1,83	1,76	1,76	1,72	1,69	1,68	1,66	1,66
LO	1,29	1,35	1,35	1,34	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,29
LO 2	1,63	1,88	1,85	1,84	1,78	1,77	1,76	1,74	1,74	1,72
LR	1,36	1,44	1,45	1,47	1,47	1,45	1,45	1,41	1,41	1,40
LR 2	1,46	1,64	1,65	1,64	1,63	1,63	1,64	1,64	1,61	1,62
LR 3	1,11	1,52	1,58	1,54	1,53	1,53	1,53	1,51	1,50	1,51
LR 4	1,39	1,52	1,55	1,61	1,58	1,57	1,59	1,58	1,56	1,58
LRY	1,01	1,34	1,45	1,43	1,44	1,42	1,47	1,46	1,46	1,46

Figura 18: Ratio entre la potencia emitida bajo radiación AM0 y la de AM1.5G en función de z_e .

fueron LR 4 con 0.102 mW y LRY con 0.101 mW, alrededor de un 10 % de la potencia emitida por un puntero láser común. Al ser LR 4 y LRY las fibras más prometedoras en términos de su potencia emitida, fueron las seleccionadas para las mediciones de fotoestabilidad.

Ajustes de la potencia total emitida

Con los resultados recogidos en la Figura 17, se utilizó la Ec. (6) para realizar un ajuste no lineal a los mismos y así poder determinar las constantes P_{sat} y C . Los resultados numéricos del ajuste se encuentran en la Tabla 9, mientras que su representación gráfica se expone en las Figuras 19 y 20.

Potencia de salida bajo radiación AM0

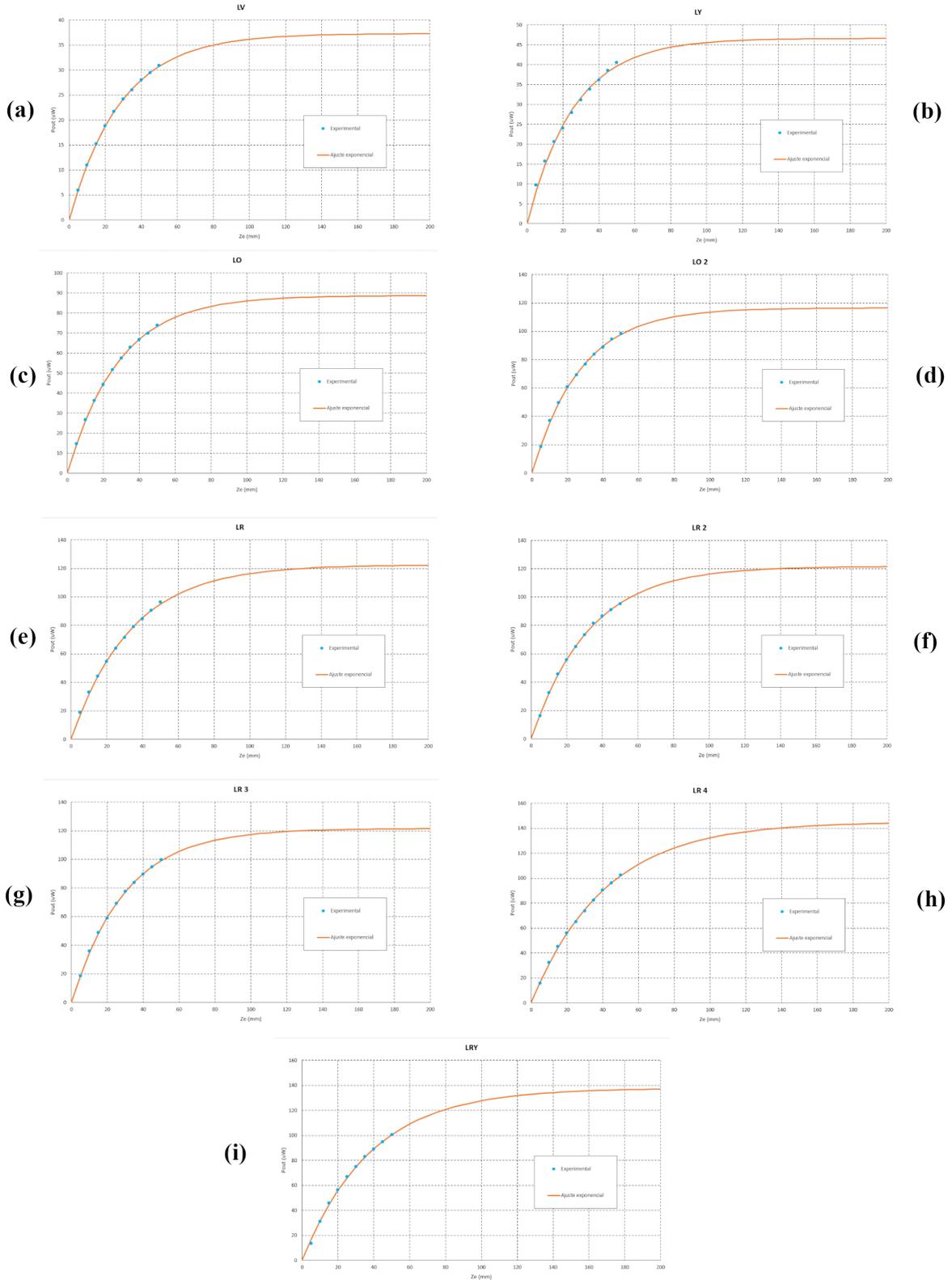


Figura 19: Potencia emitida frente a z_e para condiciones de radiación AM0. Los puntos corresponden a los datos experimentales y las líneas continuas al ajuste de la Ec. (6) a los puntos experimentales.

Potencia de salida bajo radiación AM1.5G

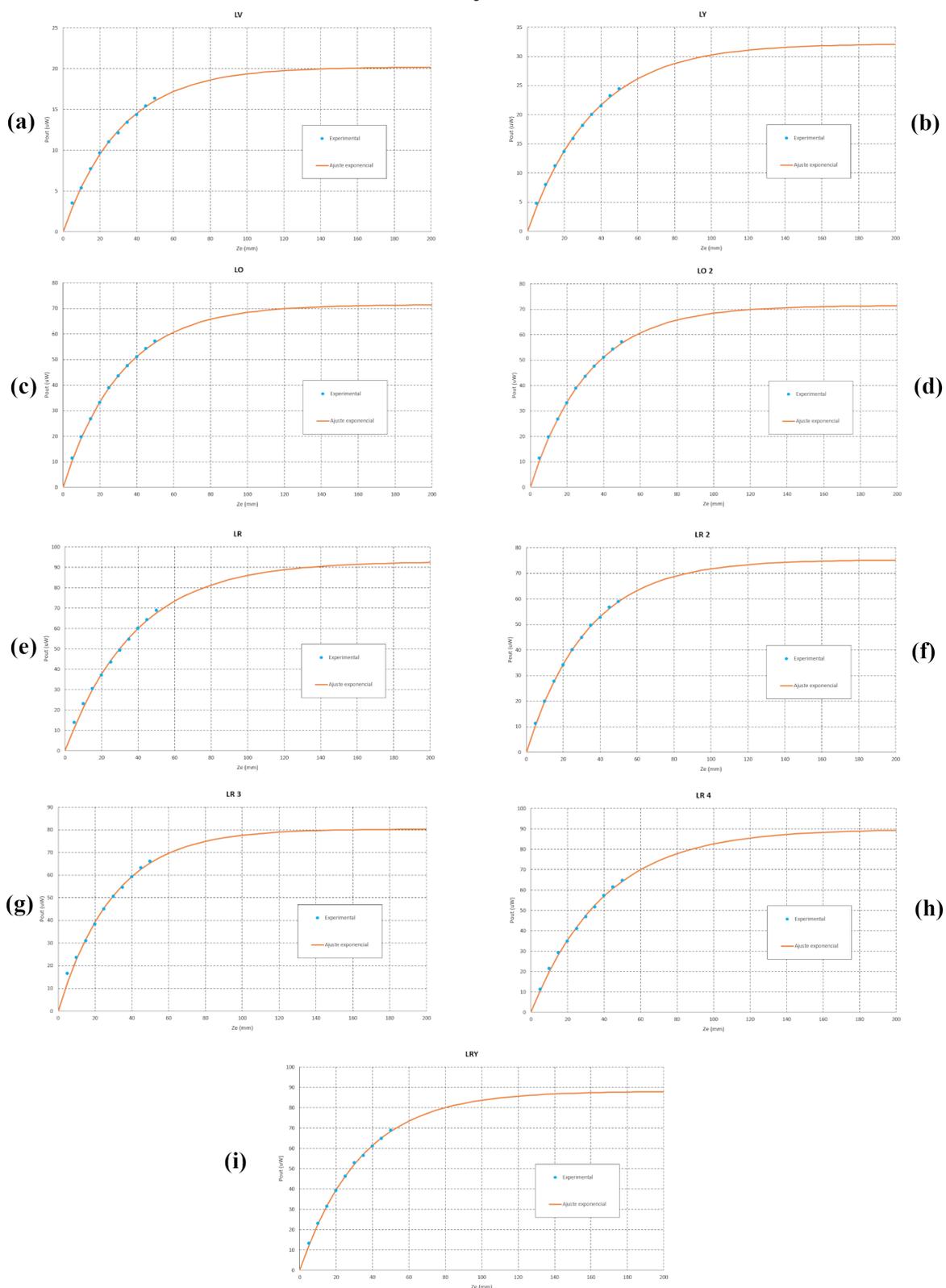


Figura 20: Potencia emitida frente a z_e para condiciones de radiación AM1.5G. Los puntos corresponden a los datos experimentales y las líneas continuas al ajuste de la Ec. (6) a los puntos experimentales.

Código de fibra	Sim.	P_{sat} (μW)	C (mm^{-1})	R^2
LV	AM0	37.31 ± 0.06	0.0348 ± 0.0001	0.9998
LY	AM0	46.6 ± 0.4	0.0380 ± 0.0007	0.9951
LO	AM0	88.7 ± 0.2	0.0350 ± 0.0001	0.9997
LO 2	AM0	116.5 ± 0.4	0.0366 ± 0.0003	0.9991
LR	AM0	122.5 ± 0.6	0.0298 ± 0.0003	0.9988
LR 2	AM0	121.7 ± 0.3	0.0309 ± 0.0002	0.9995
LR 3	AM0	121.6 ± 0.3	0.0337 ± 0.0002	0.9996
LR 4	AM0	145.1 ± 0.6	0.0242 ± 0.0002	0.9990
LRY	AM0	137.8 ± 0.8	0.0261 ± 0.0002	0.9985
LV	AM1.5G	20.2 ± 0.1	0.0317 ± 0.0004	0.9972
LY	AM1.5G	32.2 ± 0.2	0.0280 ± 0.0002	0.9987
LO	AM1.5G	71.5 ± 0.2	0.0315 ± 0.0002	0.9995
LO 2	AM1.5G	71.5 ± 0.2	0.0315 ± 0.0002	0.9995
LR	AM1.5G	92.9 ± 0.8	0.0260 ± 0.0004	0.9967
LR 2	AM1.5G	75.3 ± 0.2	0.0305 ± 0.0001	0.9997
LR 3	AM1.5G	80.4 ± 0.8	0.0335 ± 0.0007	0.9939
LR 4	AM1.5G	89.9 ± 0.5	0.0251 ± 0.0002	0.9981
LRY	AM1.5G	88.1 ± 0.3	0.0299 ± 0.0002	0.9991

Tabla 9: Valores de los parámetros del ajuste de la potencia total usando la Ec. (6). R^2 es el coeficiente de determinación.

En las Figuras 19 y 20 puede verse como el parámetro P_{sat} (Tabla 9) caracteriza la potencia total de saturación. El parámetro C por otro lado, define la forma de la exponencial y está relacionado con el coeficiente de atenuación promediado a todas las longitudes de onda. Un valor de C bajo (Tabla 9 LR 4) implica una curva exponencial más suave (Figura 19h). Aun así, no se observa mucha variación en el parámetro C entre las fibras y entre los simuladores, lo que hace que las formas de las exponenciales sean bastante similares en todas las curvas de las Figuras 19 y 20.

Bajo ambos simuladores solares puede observarse que los valores más bajos de C están relacionados con los valores mayores de P_{sat} (Tabla 9). Como era de esperar, las fibras con mejor comportamiento en base a estos valores son LR 4 y LRY con unos valores de potencia de saturación de 0.145 mW y 0.138 mW, respectivamente. En cuanto a la longitud de fibra excitada para alcanzar la saturación, en las Figuras 19 y 20 puede verse que, de acuerdo con el ajuste de la Ec. (6), los valores esperados de z_e van de los 16 cm a los 20 cm.

3.1.4. Fotoestabilidad

La fotoestabilidad ha sido estudiada en las fibras dopadas LR 4 y LRY sometiendo a 3 días de iluminación constante bajo ambos simuladores solares. En estas medidas se iluminaron 25 mm de fibra con $z_{ne} = 3.3$ cm (Tabla 6).

3 días de exposición a radiación AM0 para LR 4

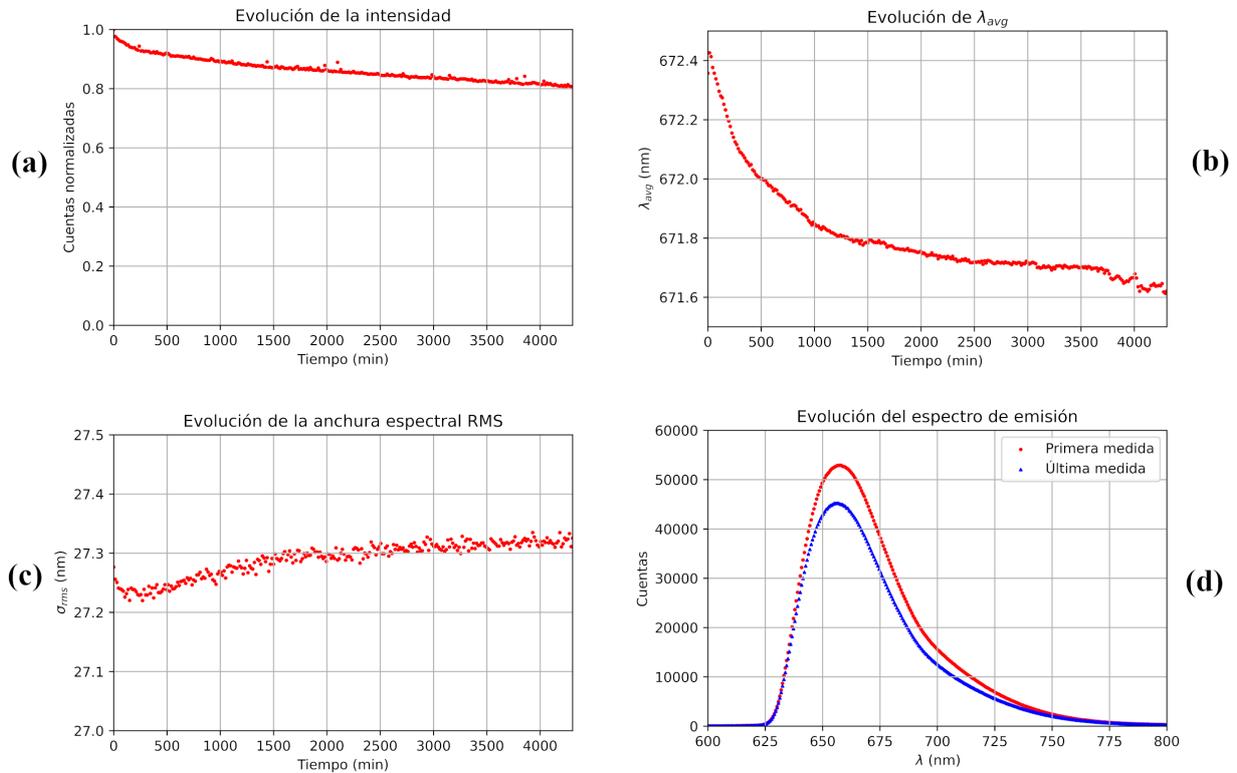


Figura 21: Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LR 4 bajo AM0. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 35°C, mientras que la ambiente era de 27°C.

Los resultados del estudio de la fotoestabilidad para las fibras LR 4 y LRY bajo radiación AM0 se muestran en las Figuras 21 y 22, respectivamente. La temperatura registrada durante cada período de exposición se ha indicado en el pie de figura correspondiente.

En las Figuras 21a y 22a se observa un decrecimiento de la intensidad emitida similar en ambos casos, LR 4 pasa de un 100 % a un 81 % y LRY de 100 % a 83 %. Ambas fibras muestran cambios en sus pendientes durante las primeras horas de exposición: LR 4 sobre los 300 minutos y LRY sobre los 100 min. Tras estos períodos de rápida degradación inicial, las curvas se vuelven más suaves en ambas fibras, un comportamiento que se caracterizará en la siguiente sección.

En términos de degradación total, LRY muestra una menor que LR 4, un resultado que se repetirá en secciones posteriores. Esto podría deberse a que LRY exhibe períodos iniciales de degradación más cortos que LR 4 hasta que se produce el cambio de tendencia.

En cuanto a la evolución temporal de la longitud de onda media, se ha registrado un comportamiento similar para ambas POFs (Figuras 21b y 22b). Un primer tramo de decrecimiento más pronunciado hasta los 500 minutos aproximadamente, seguido de un

3 días de exposición a radiación AM0 para LRY

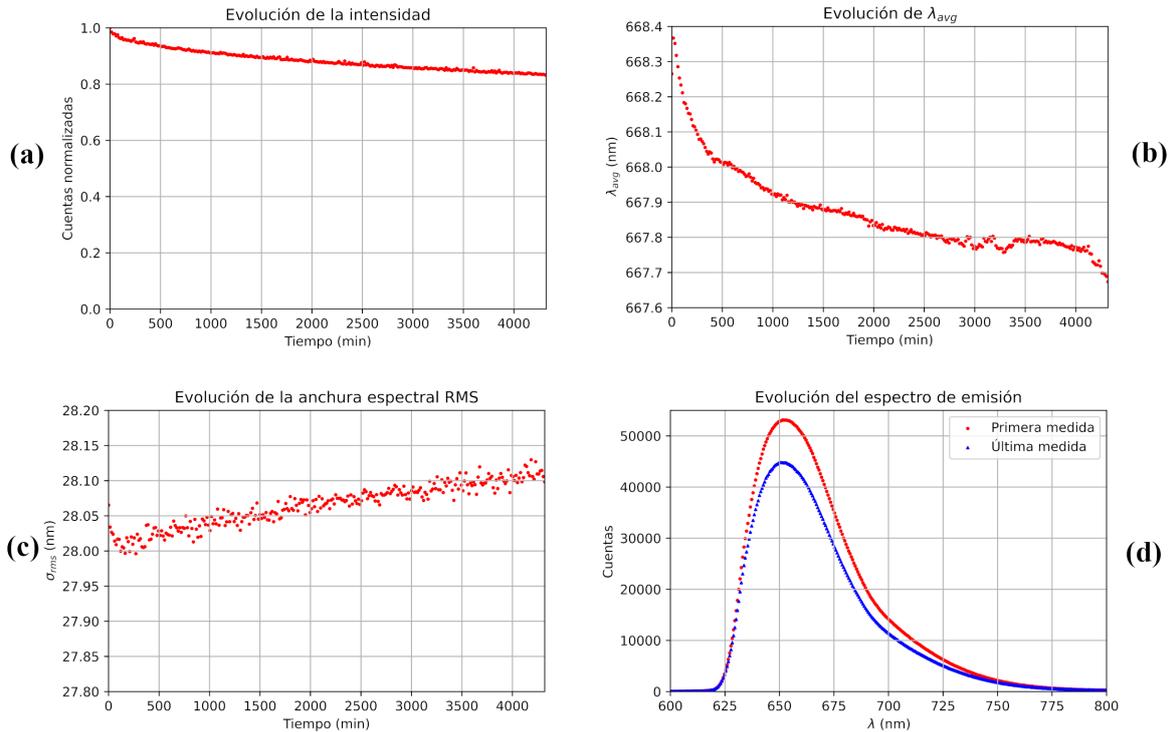


Figura 22: Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LRY bajo AM0. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 35°C , mientras que la ambiente era de 26.5°C .

decaimiento más suave, un comportamiento muy similar al observado para la evolución de la intensidad. El *blue-shift* total que sufren ambas fibras es pequeño, LR 4 0.8 nm en 3 días y LRY 0.7 nm. Este *blue-shift* es el resultado de la degradación de la fibra al estar expuesta a radiación, en particular al rango UV. Como se ha mencionado previamente, esta radiación rompe enlaces moleculares afectando a la concentración de la fibra dopada, lo que resulta en un pequeño *blue-shift*.

Finalmente, en la evolución temporal de la anchura espectral RMS (Figura 21c y 22c) se ha registrado un comportamiento similar entre ambas fibras. En la anchura espectral se observa un ligero incremento, de menos de 0.1 nm, que podría estar relacionado con la degradación de la fibra.

Simulador AM1.5G

Bajo radiación AM1.5G, ambas POFs muestran un comportamiento similar en las curvas de evolución temporal de la intensidad, similar también al mostrado bajo radiación AM0 (Figuras 23a y 24a). Ambas curvas muestran dos secciones diferenciadas, una primera de degradación más pronunciada hasta 400 minutos aproximadamente, seguida de un decaimiento con una pendiente más suave. La fibra LRY muestra el período de degradación

3 días de exposición a radiación AM1.5G para LR 4

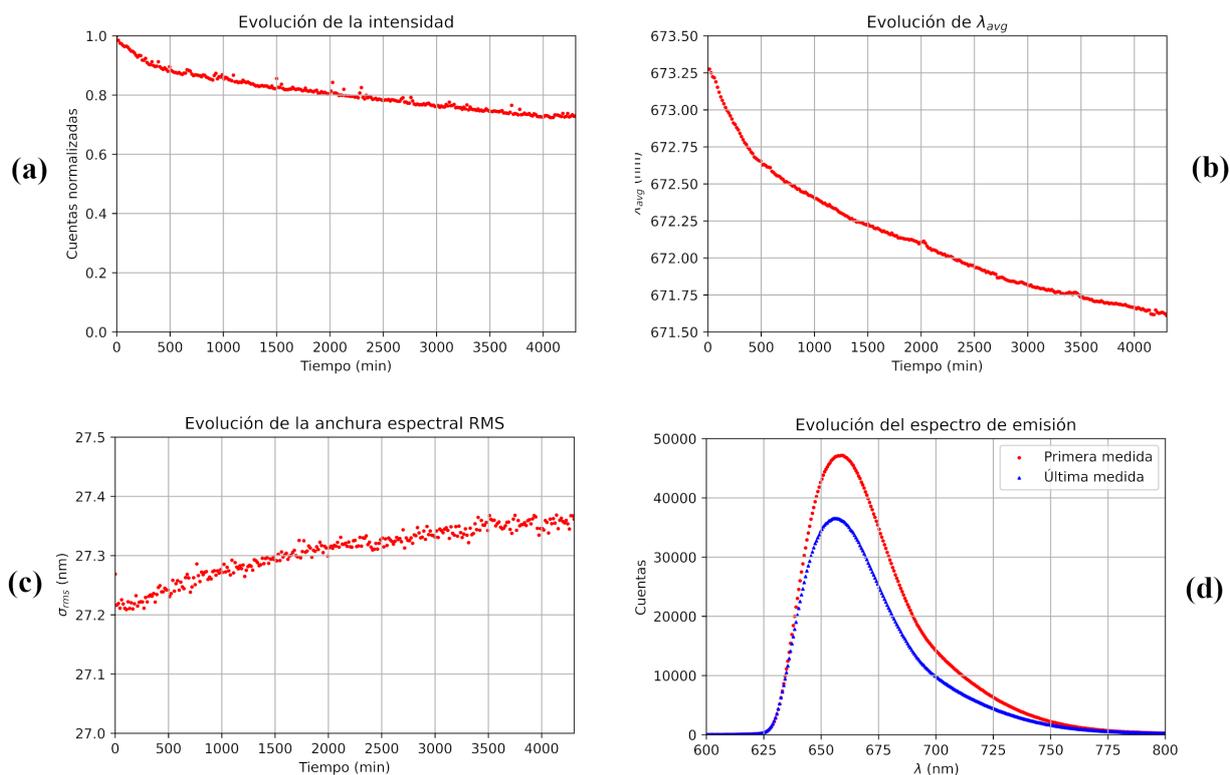


Figura 23: Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LR 4 bajo AM1.5G. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 34.5°C , mientras que la ambiente era de 27°C .

inicial más corto. En cuanto a la degradación total, LRY muestra el comportamiento esperado: la intensidad se degrada un 2 % menos que bajo radiación AM0 (De 100 % hasta 85 %). Bajo AM1.5G es razonable que la degradación sea menor, tanto porque la intensidad general de la radiación es menor, como porque la región de radiación UV se reduce respecto a AM0 (Figura 3). Sin embargo, LR 4 muestra una degradación mayor bajo radiación AM1.5G que bajo radiación AM0. Se ha detectado un aumento del 7 % respecto a la degradación mostrada bajo radiación AM0. Debido a lo inesperado del resultado se repitieron las mediciones para LR 4 bajo ambos simuladores, obteniéndose en ambos casos prácticamente los mismos resultados. La respuesta a este resultado podría residir en los distintos comportamientos de los colorantes orgánicos bajo radiación EM, debido a su composición química, concentración, etc.

Para la longitud de onda media se observan resultados similares a los obtenidos bajo AM0. LRY muestra un *blue-shift* total de unos 0.7 nm, debido a la degradación de la fibra. En el caso de LR 4 el *blue-shift* es mucho mayor, en torno a los 1.5 nm, casi el doble que el observado bajo AM0. Este *blue-shift* más grande tiene sentido teniendo en cuenta

3 días de exposición a radiación AM1.5G para LRY

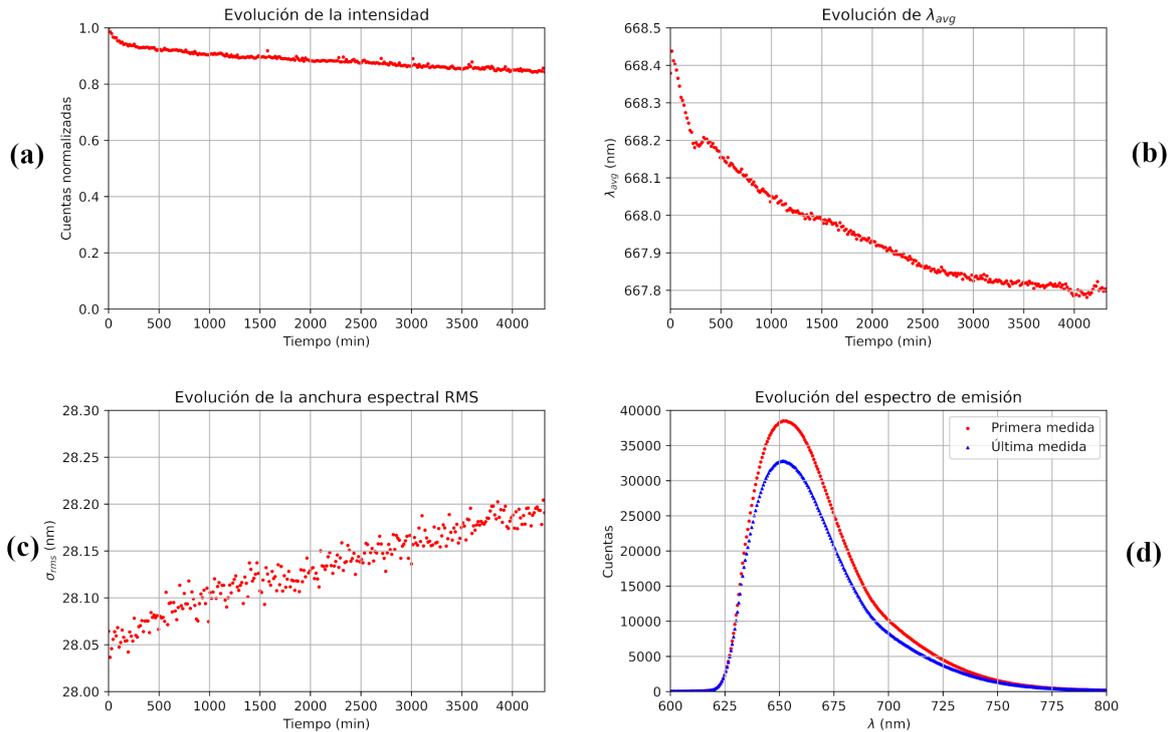


Figura 24: Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LRY bajo AM1.5G. Con la lámpara encendida la temperatura registrada era de 35°C , mientras que la ambiente era de 27°C .

la degradación mayor observada. En términos de las formas de las curvas, no se observan diferencias notables entre las obtenidas con los dos simuladores (Figuras 23b y 24b).

Por último, la evolución temporal de la anchura espectral RMS (Figura 23c y 24c) es muy similar, tanto entre fibras, como al compararla con la mostrada bajo el simulador AM0. La anchura espectral crece alrededor de 0.15 nm bajo AM1.5G, 0.05 nm más que con radiación AM0. La comparación entre el primer y último espectro de emisión ayuda a visualizar la degradación de las fibras en forma espectral.

Ajustes de las curvas de degradación temporal

Las curvas de la degradación de la intensidad emitida a lo largo del tiempo tienen un doble comportamiento exponencial, motivo por el cual se decidió usar una doble exponencial para ajustar las curvas experimentales (Ec. (7)). A continuación se presentarán los resultados de los ajustes de la Ec. (7) a estas curvas de degradación, junto con una breve interpretación de los resultados obtenidos.

3 días de exposición

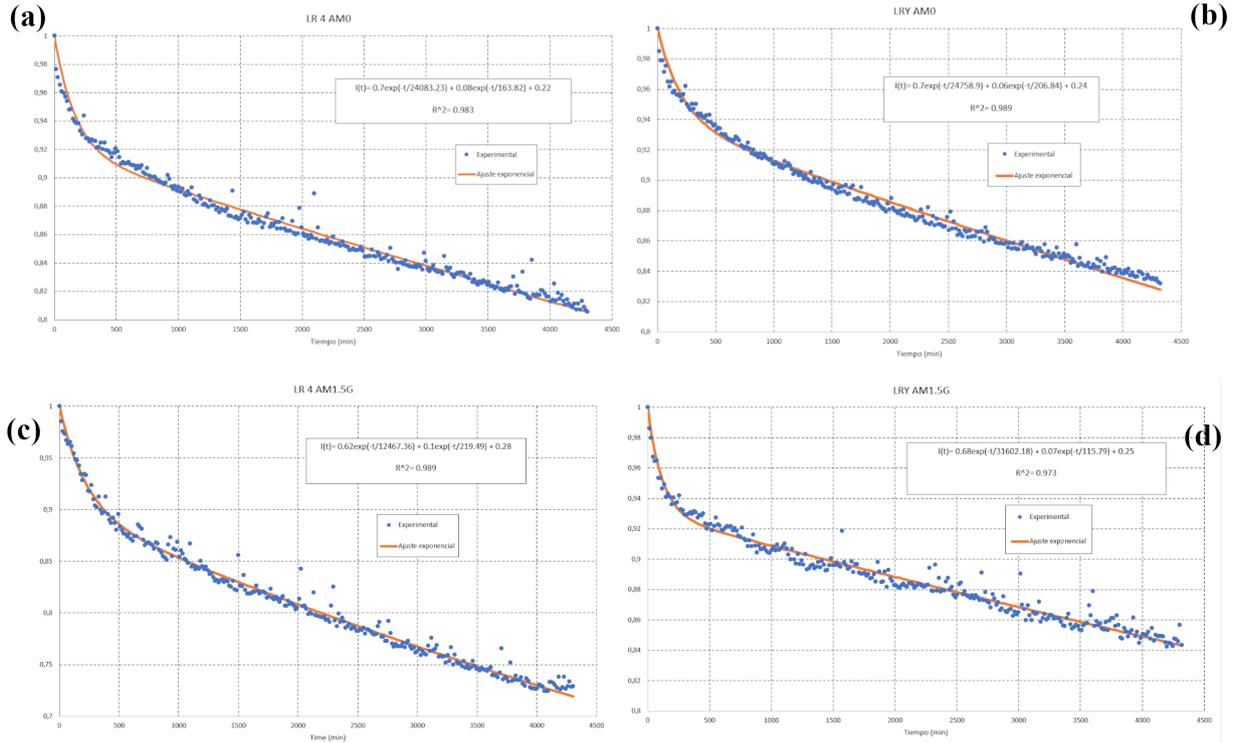


Figura 25: Intensidad normalizada en función del tiempo. (a) LR 4 bajo AM0; (b) LRY bajo AM0; (c) LR 4 bajo AM1.5G; (d) LRY bajo AM1.5G. $z_e = 25$ mm y $z_{ne} = 33$ mm. Los puntos azules corresponden a los datos experimentales y las líneas continuas a los ajustes de Ec. (7).

La Figura 25 muestra los ajustes exponenciales a las curvas de degradación para las fibras LR 4 y LRY bajo ambos simuladores solares. Puede verse como todas las curvas de degradación se ajustan bien a una doble exponencial (Ec. (7)), ya que se pueden describir los cambios de pendiente que sufren las curvas en torno a los 400 minutos. Los valores numéricos de los parámetros obtenidos al hacer el ajuste están recogidos en la Tabla 10.

Los parámetros más interesantes de la Tabla 10 son τ_A y τ_B que caracterizan los tiempos de degradación de la fibra. τ_A describe la degradación a largo plazo y τ_B la caracteriza a tiempo corto. Empezando por τ_B , los resultados obtenidos son similares tanto entre fibras, como entre simuladores solares. Puede verse como para LR 4, τ_B aumenta al pasar de AM0 a AM1.5G, mientras que para LRY se da lo contrario, disminuye. Con respecto a τ_A los valores

Código de fibra	Sim.	A (a.u)	B (a.u)	C (a.u)	τ_A (min)	τ_B (min)	R²
LR 4	AM0	0.7	0.08	0.22	24100 \pm 100	164 \pm 6	0.983
LRY	AM0	0.7	0.06	0.24	24800 \pm 100	207 \pm 8	0.989
LR 4	AM1.5G	0.62	0.1	0.28	12470 \pm 50	220 \pm 7	0.989
LRY	AM1.5G	0.68	0.07	0.25	31600 \pm 200	116 \pm 6	0.973

Tabla 10: Valores de los parámetros de los ajustes a las curvas de degradación temporal usando la Ec. (7). R² es el coeficiente de determinación de cada ajuste.

bajo radiación AM0 son muy similares entre LR 4 y LRY. La mayor diferencia se da bajo radiación AM1.5G, donde τ_A aumenta considerablemente para LRY, mientras que para LR 4 disminuye. Esto podría estar relacionado con la anómala degradación mostrada por LR 4 bajo radiación AM1.5G.

En cuanto a qué características son las más prometedoras para futuras aplicaciones, serían valores elevados de τ_A y τ_B , provocando que la fibra tardara en degradarse y lo hiciese de manera suave. Por lo tanto, de entre las fibras estudiadas, LRY parece ser la más prometedora con una τ_A mayor que la de LR 4 bajo ambos simuladores y mostrando una degradación total menor como se ha visto en secciones anteriores.

3.2. Ciclos LEO

Las Figuras 26 y 27 muestran los resultados bajo ciclos de iluminación LEO para LR 4 y LRY, respectivamente. En estas gráficas se ha incluido la variación de la temperatura en la fibra durante los ciclos. Cuando la lámpara estaba encendida la temperatura subía instantáneamente hasta los 34.5°C y al apagarse descendía a la temperatura ambiente del laboratorio de unos $27\text{-}28^{\circ}\text{C}$. Aun así, es un buen indicador visual de cuando las fibras dopadas estaban siendo iluminadas. Para una simulación real de las condiciones en las órbitas LEO deberían simularse gradientes de temperatura de -100 a 95 grados Celsius junto a la radiación AM0. En este trabajo sólo se han estudiado los efectos de la radiación AM0 en ciclos LEO.

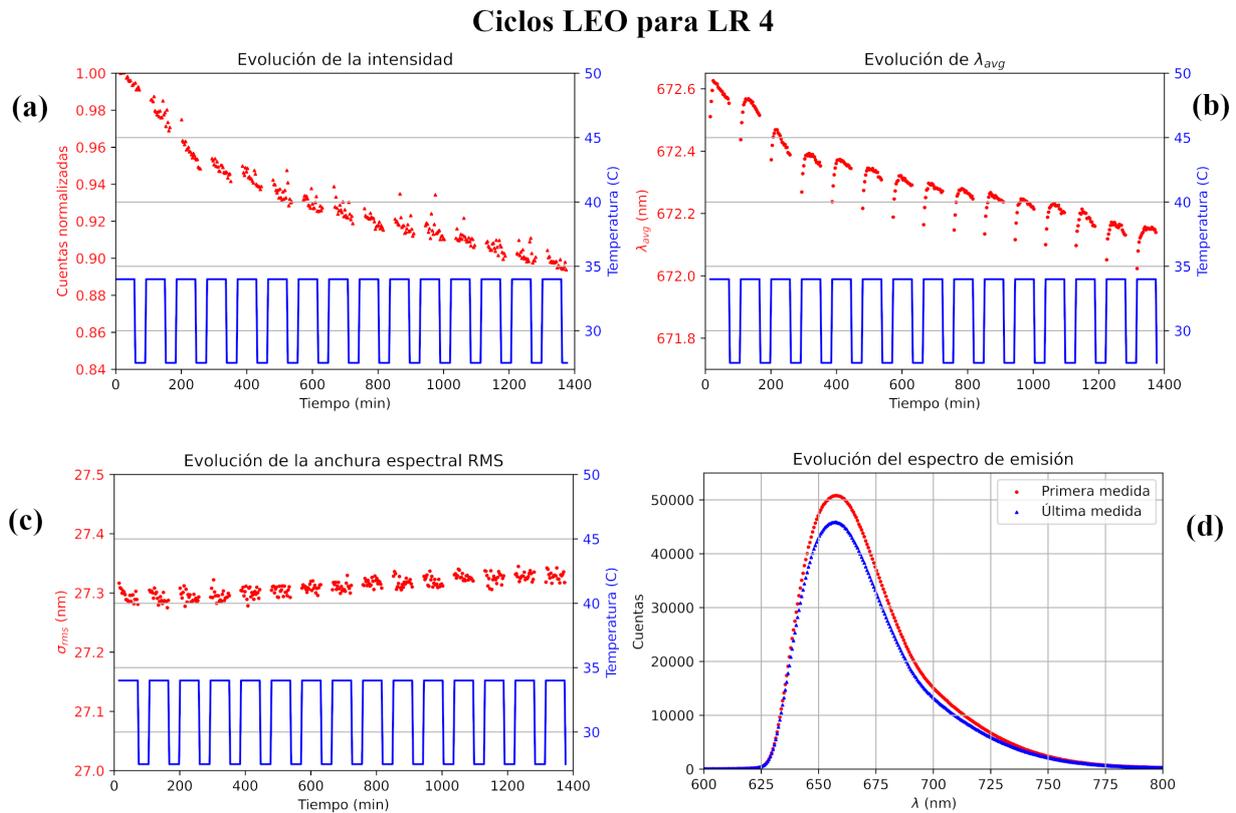


Figura 26: Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LR 4 bajo ciclos LEO.

En relación a la intensidad emitida en las 24 horas analizadas, LR 4 se degrada hasta un 89% de su valor inicial y LRY desciende hasta un 92.5% de su valor inicial. La mayor diferencia entre ambas es la forma de sus curvas de degradación. Por un lado, LR 4 exhibe una tendencia general similar a las exponenciales mostradas en la Figura 25, con un cambio de pendiente alrededor de los 300 minutos. LR 4 muestra signos de recuperación durante los períodos de sombra. Un ejemplo de esta recuperación puede verse en la Figura 26a en $t=400$ minutos. En ese punto, al comenzar el nuevo período de luz la intensidad ha sufrido una

recuperación relativa de un 50 % respecto al punto dónde termina el período de iluminación anterior. Por otro lado, LRY muestra un comportamiento completamente diferente. Sufre una degradación más grande cuando es iluminada y una recuperación relativa mayor cuando está en sombra (Figura 27a). LRY muestra recuperaciones relativas entre períodos de iluminación de hasta un 90 %. Esta mayor recuperación hace que LRY se degrade en total un 4 % menos que LR 4.

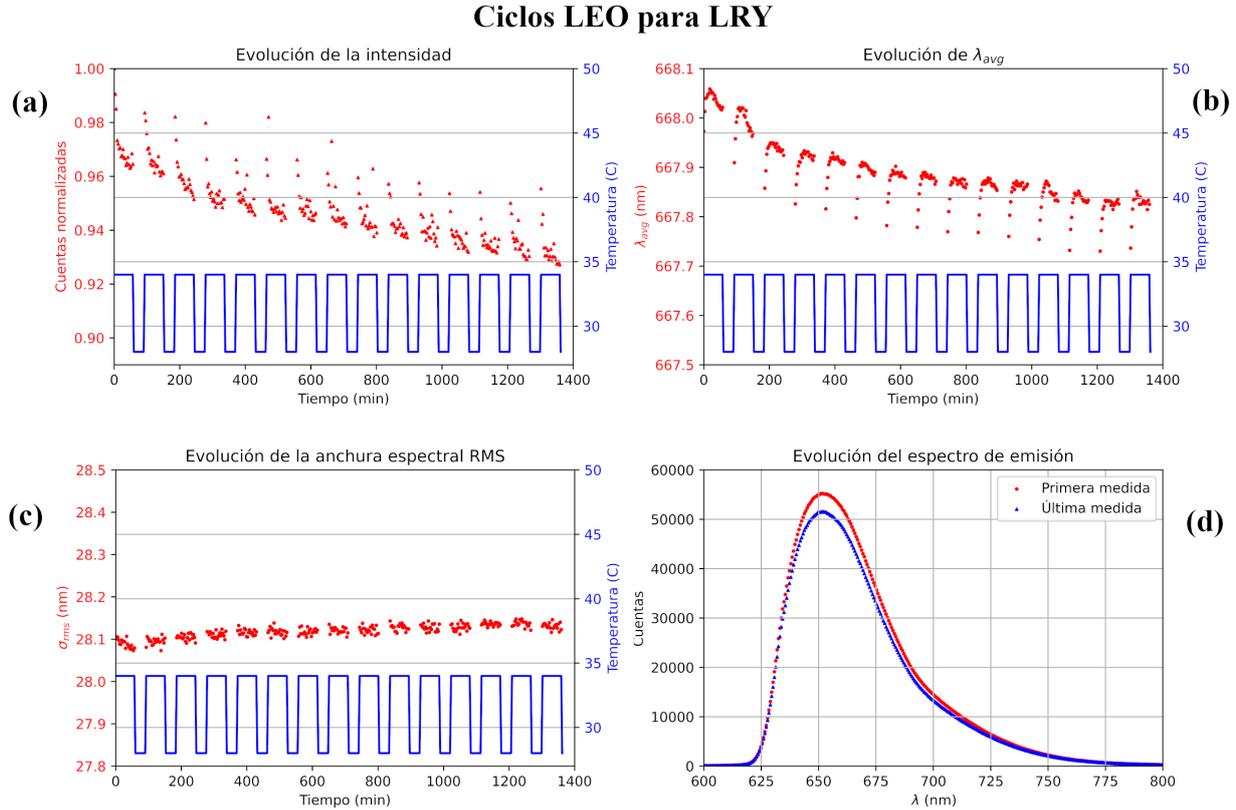


Figura 27: Evolución temporal de la intensidad de emisión (a), de λ_{avg} (b), de la anchura espectral RMS (c) y del espectro de emisión (d) para la fibra LRY bajo ciclos LEO.

Como era de esperar las fibras se degradan menos durante los ciclos LEO que durante la exposición constante de 3 días (sección 3.1.4). Durante las 24 horas de los ciclos LEO las fibras se degradan alrededor de un 9 % menos que durante los 3 días de exposición constante. Comparando únicamente las primeras 24 horas de la exposición constante también se observa que durante los ciclos LEO las fibras se degradan menos (Figura 10), debido a que al contar con períodos de sombra las fibras pueden recuperarse. Para LR 4 (Figura 10a), se observa que durante la iluminación ininterrumpida se degrada un 7 % más que durante los ciclos LEO en 24 horas. En cuanto a LRY (Figura 10b), el incremento en degradación debido a la constante exposición es del 3 %.

Con respecto a la evolución temporal de la longitud de onda media se puede deducir un comportamiento similar en ambas fibras (Figuras 26b y 27b) asimismo, se pueden ver dos

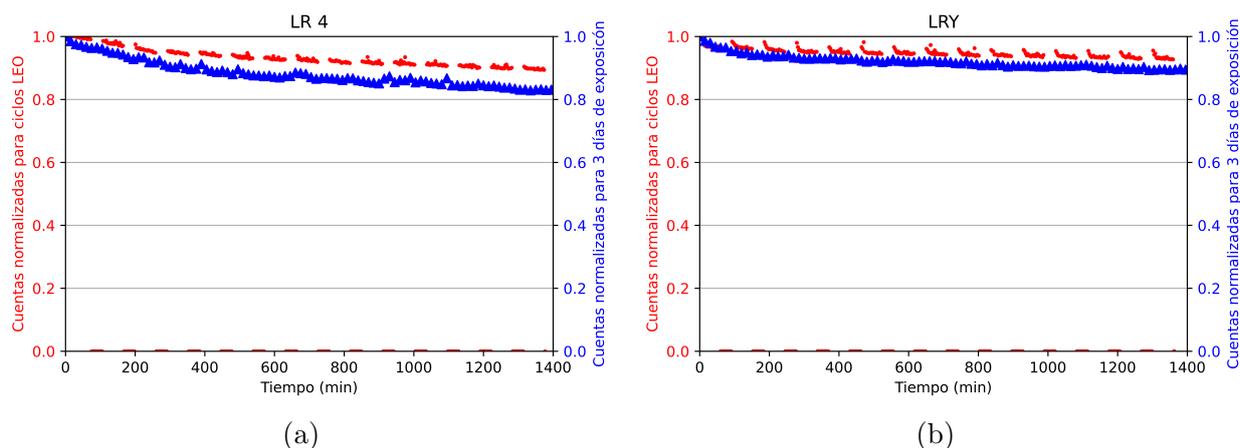


Figura 28: Evolución temporal de la intensidad emitida bajo radiación AM0. (a) LR 4; (b) LRY. Puntos rojos: Ciclos LEO. Triángulos azules: Exposición continua.

fenómenos distintos sucediendo simultáneamente. La tendencia general de *blue-shift* producto de la degradación rompiendo los enlaces moleculares y el *red-shift* al comienzo de cada período de iluminación resultado del aumento de la temperatura. Estos efectos fueron caracterizados en [23] por J. Grandes et al.. En ese trabajo se determinó que un aumento de la temperatura producía cambios activados térmicamente tanto en la matriz PMMA de la POF, como en el colorante, que provocaban pequeños *red-shifts*. En las Figuras 26b y 27b, puede verse como los *red-shifts* inducidos térmicamente al comienzo de cada período de iluminación son superados por los *blue-shifts* provocados por la degradación general en un espacio corto de tiempo. LR 4 sufre un *blue-shift* total de 0.6 nm y LRY uno de 0.3 nm, lo que está de acuerdo con la menor degradación total mostrada por LRY frente a LR 4.

Por último, la evolución de la anchura espectral (Figuras 26c y 27c) es muy similar entre ambas fibras. Un leve incremento, de aproximadamente un 0.1 nm, en las anchuras espectrales debido a la degradación de las fibras.

4. Conclusiones

En este trabajo se han estudiado experimentalmente los efectos de la radiación solar en el exterior de la atmósfera terrestre (AM0) en concentradores solares de fibras fluorescentes (FFSC) para aplicaciones en entornos espaciales. Se ha medido la intensidad espectral emitida por las fibras ópticas de polímero dopadas en función de la longitud iluminada y/o del tiempo y se han comparado estos resultados obtenidos bajo la radiación AM0, con los obtenidos con las mismas fibras bajo radiación solar en la superficie terrestre (AM1.5G). Las fibras analizadas han sido fabricadas por el grupo de investigación Applied Photonics en colaboración con el instituto de polímeros del CSIC en Madrid. Los materiales dopantes utilizados para las fibras han sido colorantes orgánicos basados en derivados de perileno: Lumogen violet, Lumogen yellow, Lumogen orange y Lumogen red. Las principales aportaciones de este TFM han sido:

- Se ha calibrado un simulador solar que emite radiación AM0 y puesto a punto un montaje experimental para caracterizar fibras dopadas bajo esta radiación.
- Se ha medido, bajo radiación AM0, la evolución del espectro de emisión en función de la longitud de fibra iluminada (z_e). En casi todas las muestras, la evolución de la λ_{avg} del espectro de emisión exhibe un *red-shift* (≈ 10 nm) con una tendencia a la saturación, mientras que la anchura espectral RMS disminuye (≈ 8 nm) y también se satura con valores largos de z_e . En general los comportamientos de las fibras bajo las radiaciones AM0 y AM1.5G son similares, excepto para la fibra codopada LRY donde se ha observado que $(\lambda_{avg})_{AM0} > (\lambda_{avg})_{AM1,5G}$ y que $(\sigma_{RMS})_{AM0} > (\sigma_{RMS})_{AM1,5G}$ para todo valor de z_e .
- Se ha medido, bajo radiación AM0, la potencia total emitida por las fibras en función de z_e . Se ha comprobado que la potencia aumenta con z_e hasta saturarse y se han realizado ajustes a una expresión teórica (Ec. (7)), para estimar los valores de la potencia de saturación y los coeficientes de atenuación promediados. Los mayores valores para la potencia total se han obtenido para la fibra Lumogen Red de mayor concentración (LR 4) y para la fibra codopada Lumogen Red Yellow (LRY) con valores de 0.102 mW y 0.101 mW, respectivamente. No se ha apreciado una diferencia significativa entre la respuesta de las fibras de nueva fabricación y las antiguas.
- Se ha estudiado la fotoestabilidad de la emisión de las fibras LR 4 y LRY bajo radiación AM0 constante durante 3 días. Se ha detectado una degradación de la intensidad del 19% en LR 4 y del 17% en LRY. En ambos casos el decaimiento temporal se ha caracterizado con dos tiempos de degradación, uno corto de unos 180 minutos y uno largo de aproximadamente 24500 minutos (≈ 17 días). Se ha registrado un *blue-shift* en λ_{avg} resultado de la degradación de las fibras de alrededor de 1 nm.
- Se ha analizado el comportamiento de la emisión de las fibras LR 4 y LRY bajo radiación AM0 durante 24 horas siguiendo ciclos LEO (60 min de luz y 33 min de sombra). Se ha comprobado que las fibras se recuperan cuando no son iluminadas, LR 4 ha mostrado recuperaciones relativas del 50% y LRY casi del 90%. Se han detectado

red-shifts en λ_{avg} debido al aumento de la temperatura al inicio de cada ciclo y un *blue-shift* general resultado de la degradación.

4.1. Líneas futuras de investigación

- Simular, de manera simultánea, la radiación AM0 y los gradientes de temperatura sufridos en órbitas LEO para estudiar así sus efectos sobre los FFSC.
- Estudiar los efectos de la radiación solar AM0 sobre lotes de fibras dopadas, caracterizando las potencias totales emitidas en diferentes configuraciones.

Referencias

- [1] Eurostat. *Renewable energy statistics*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics#Share_of_renewable_energy_more_than_doubled_between_2004_and_2021.
- [2] Proyecto de energía solar espacial. URL: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/se-envia-energia-solar-espacio-a-tierra-por-primera-vez-historia_20073.
- [3] NASA. URL: <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/astp.html>.
- [4] Itxaso Parola Domingo. «Doped polymer optical fibers for high performance fluorescent fiber applications». Tesis doct. University of the Basque Country, 2018.
- [5] Solar Paces. *CSP Projects around the world*. URL: <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>.
- [6] Renewable Technology. *Gemasolar concentrated solar power*. URL: <https://www.renewable-technology.com/projects/gemasolar-concentrated-solar-power-seville/>.
- [7] David R Needell et al. «Ultralight Luminescent Solar Concentrators for Space Solar Power Systems». En: *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. IEEE. 2019, págs. 2798-2801.
- [8] Kim K De Groh et al. «MISSE 2 PEACE polymers atomic oxygen erosion experiment on the international space station». En: *High Performance Polymers* 20.4-5 (2008), págs. 388-409.
- [9] Robert A. Rhode. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2623187>.
- [10] American Society for Testing y Materials. «Standard tables for Reference solar spectral irradiances: Direct Normal and hemispherical on 37° tilted surface (standard G173-03)». En: (2020).
- [11] Jacob I Kleiman, Masahito Tagawa y Yugo Kimoto. *Protection of materials and structures from the space environment*. Springer, 2006.
- [12] Yifan Lu et al. «A review of the space environment effects on spacecraft in different orbits». En: *IEEE access* 7 (2019), págs. 93473-93488.
- [13] Md Mahbubur Rahman, Divya Shankar y Shreya Santra. «Analysis of radiation environment and its effect on spacecraft in different orbits». En: *Conference: international Astronautical Congress (IAC2017)*. 2017, págs. 8073-8079.
- [14] DEWESoft. *Every Satellite Orbiting Earth and Who Owns Them*. URL: <https://dewesoft.com/blog/every-satellite-orbiting-earth-and-who-owns-them>.
- [15] Yannick Borthomieu. «Satellite Lithium-ion batteries». En: *Lithium-ion batteries*. Elsevier, 2014, págs. 311-344.

- [16] Xianming Wang et al. «Cycle-life testing of 100-Ah class lithium-ion battery in a simulated geosynchronous-Earth-orbit satellite operation». En: *Journal of power sources* 160.1 (2006), págs. 602-608.
- [17] A Allasio et al. «GOCE mission: design phases and in-flight experiences». En: *Advances in the Astronautical Sciences* 137.53 (2010), pág. 2010.
- [18] MZ Naser y AI Chehab. «Polymers in space exploration and commercialization». En: *Polymer Science and Innovative Applications* (2020), págs. 457-484.
- [19] Wolfgang Baumjohann y Rudolf A Treumann. *Basic space plasma physics*. World Scientific, 2012.
- [20] Lyndsay Fletcher et al. «An observational overview of solar flares». En: *Space science reviews* 159 (2011), págs. 19-106.
- [21] Richard Betram. URL: <https://www.americaspace.com/2014/11/29/nasas-van-hallen-probes-detect-life-protective-electron-barrier-inside-the-earths-radiation-belts/>.
- [22] ESA. *About Space Debris*. URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris.
- [23] Jon Grandes et al. «Temperature effects on the emission of polymer optical fibers doped with Lumogen dyes». En: *Optical Fiber Technology* 72 (2022), pág. 102980.