

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***EFECTOS DE LA TEMPERATURA
EN CONCENTRADORES SOLARES DE
FIBRAS LUMINISCENTES PARA
APLICACIONES EN ENTORNOS
ESPACIALES***

**Estudiante
Director/a
Codirector/a
Departamento
Curso académico**

*Grandes, Casado, Jon
Illarramendi, Leturia, M. Asunción
Zubia, Zaballa, Joseba
Física Aplicada I
2019/2020*

Bilbao, 13 de Octubre de 2020

ABSTRACT/RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado la viabilidad de los concentradores solares de fibras luminiscentes para utilizarlos en entornos espaciales. Para ello se han realizado una serie de experimentos con fibras ópticas de polímero dopadas con diferentes materiales luminiscentes, concentraciones y métodos de fabricación para determinar la fotoestabilidad de la señal emitida por las fibras. Por una parte, se ha analizado la variación de la intensidad durante periodos largos de tiempo y ciclos de iluminación/oscuridad utilizando un simulador solar calibrado (AM1.5G) y por otra, se ha medido la fotoestabilidad de las fibras en función de la temperatura utilizando un horno, y en varios ciclos térmicos. Se ha concluido que las fibras dopadas con el colorante orgánico lumogen red son estables en periodos largos de exposición a la radiación solar (decaimiento menor del 6%) y que las fibras estudiadas son estables con un decaimiento menor del 20% en ciclos térmicos de hasta 90 °C.

In this work, the viability of fiber luminiscent solar concentrators for use in space environment has been studied. To this end, some experiments have been carried out with polymer optical fibers doped with different luminiscent materials, concentrations and manufacturing methods to determine the photostability of the signal emitted by the fibers. On the one hand, the variation of intensity over long periods of time and lighting/dark cycles has been analyzed using a calibrated solar simulator (AM1.5G) and, on the other, the photostability of the fibers has been measured as a function of temperature using an oven, and in several thermal cycles. It has been concluded that the fibers doped with the organic dye lumogen red are stable in long periods of exposure to solar radiation (decay less than 6%) and that the fibers studied are stable with a decay less than 20% in thermal cycles of up to 90 ° C.

Lan honetan, zuntz luminiszentekin egindako eguzki-kontzentragailuen bideragarritasuna aztertu da espazioko inguruneetan erabili ahal izateko. Horretarako, zenbait saiakuntza egin dira material luminiszente, kontzentrazio eta fabrikazio-metodo desberdinekin dopatutako zuntz optikorekin, zuntzek igorritako seinalearen fotoegonkortasuna zehazteko. Alde batetik, denbora-tarte luzeetan eta argiztapen/iluntasun-zikloetan intentsitatearen aldaketa aztertu da, kalibratutako eguzki-simulagailu bat (AM1.5G) erabiliz, eta, bestetik, labe bat erabiliz, zuntzen fotoegonkortasuna neurtu da tenperaturaren arabera eta zenbait ziklo termikotan. Ondorioztatu da, lumogen red koloratzaile organikoarekin dopatutako zuntzak egonkorak direla eguzki-erradiazioko esposizio-aldi luzeetan (beheraldia % 6a baino gutxiago) eta aztertutako zuntzak egonkorak direla 90 °C-rainoko ziklo termikoetan, beraien intentsitatea % 20 baino gutxiago jaitsiz.

Palabras clave: concentrador solar, fibra óptica, temperatura, órbita baja, espacial.

Índice

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE ACRÓNIMOS	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. CONTEXTO	7
2.1. Energía Solar	7
2.2. Concentradores Solares Luminiscentes.....	7
2.3. Condiciones ambientales en el espacio	8
2.3.1. Radiación solar	9
2.3.2. Temperatura	10
3. OBJETIVOS	11
4. BENEFICIOS DEL TRABAJO	12
5. METODOLOGIA	13
5.1. Fibras analizadas	13
5.2. Montajes experimentales.....	15
5.2.1. Efecto de la radiación solar en FLSCs en la superficie terrestre (AM1.5G)	15
5.2.2. Efecto de la temperatura en FLSCs.....	19
5.3. Procesado de datos	22
5.3.1. Análisis del espectro de emisión	23
5.3.2. Ajustes de los decaimientos (temporales)	24
6. RESULTADOS	25
6.1. Efectos de la radiación solar sobre FLSCs.....	25
6.1.1. Periodo continuo de 12 horas	25
6.1.2. Ciclos LEO	27
6.1.3. Ciclo: 16 horas de iluminación y 8 de oscuridad.	29
6.2. Efectos de la temperatura en los FLSCs	30
6.2.1. Rampa de temperatura (30-90 °C).....	30
6.2.2. Ciclos LEO (30-90 °C).....	32
7. CONCLUSIONES	34
8. LINEAS FUTURAS	35
Referencias.....	36
ANEXO 1. Código del programa de procesado de datos en Python	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de un concentrador solar luminiscente (LSC).....	7
Figura 2. Dibujo representativo de un concentrador solar compuesto por una fibra óptica de polímero luminiscente.....	8
Figura 3. Espectro solar estándar en la superficie terrestre y en el espacio.	9
Figura 4. Gráfico de la temperatura en función del tiempo de ciertos puntos de cada componente de un panel solar: 5 periodos de una órbita terrestre baja. Figura tomada de [16].....	11
Figura 5. Torre de estirado del Grupo de Investigación “Applied Photonics Bilbao”.....	14
Figura 6. Varias muestras de fibras ópticas luminiscentes fabricadas en la torre de estirado del APB.....	14
Figura 7. (a) Esquema e (b) imagen del montaje experimental del simulador solar. Leyenda: SIM: Simulador solar; FOS: Espectrómetro de fibra óptica; TER: Termopar. z_e representa la longitud de la fibra iluminada y z_n la distancia de propagación de la luz.	16
Figura 8. Detalle del soporte para la fibra y conexión al espectrómetro.....	17
Figura 9. Termopar y conector USB con display utilizados para monitorizar la temperatura de la fibra.....	17
Figura 10. Ejemplos de visualización de espectros 3D y 2D del software de Avantes Avasoft 8.	18
Figura 11. Esquema del montaje experimental para estudiar los efectos de la temperatura en FLSCs.	19
Figura 12. Espectro de emisión de la bombilla interna del horno (PHILIPS 50W GU5.3 12V).	20
Figura 13. Imagen del interior del horno donde se aprecian la disposición de los elementos introducidos por las aberturas lateral y superior.	20
Figura 14. Detalle de la disposición en el horno del termopar y la fibra.	21
Figura 15. Ejemplo de documento de texto creado por el espectrómetro con una cabecera y 5 columnas de datos. Para el procesado de datos se utilizan las columnas de longitud de onda (1) y cuentas corregidas por “dark” (5).	22
Figura 16. Ejemplo de espectro obtenido con espectrómetro. La zona de azul es el área a calcular que corresponde con la Irradiancia total (u.a).	23
Figura 17. Concepto de anchura a media altura o FWHM.	24
Figura 18. Ejemplo de ajuste de la Ec. (6) con la herramienta <i>Table Curve 2D</i> de <i>SYSTAT</i>	24
Figura 19. Intensidad emitida por las fibras y su temperatura en función del tiempo de las fibras lumogen red (LR) excitadas durante 12 horas con el simulador solar (AM 1.5G); (a): LR-m1; (b): LR-m2; (c): LR-m2; (d): LR-e1.	26
Figura 20. Intensidad en función del tiempo para varios ciclos en una órbita baja (LEO) excitando las fibras con el simulador solar (AM 1.5G); (a): LR-m3 (b): LR-m2; (c): F8BT. La evolución de la temperatura ha sido la misma en las tres fibras.	28
Figura 21. Intensidad emitida por la fibra LR-m3 en función del tiempo siendo excitada durante dos ciclos de 16 horas de luz y 8 de oscuridad con el simulador solar calibrado (AM 1.5G). Las líneas continuas son los ajustes a la Ecuación (6).....	29
Figura 22. Calibración de la temperatura del horno en función del tiempo en el experimento de la rampa de 30 a 90 °C.	30
Figura 23. Variación de la intensidad y de la temperatura de la fibra LR-m1 en función del tiempo.	30

Figura 24. Intensidad en función de la temperatura de las fibras iluminadas con la bombilla interna (50W): LR-m1, LR-e1 y POF1.	31
Figura 25. Intensidad en función de la temperatura de las fibras iluminadas con la bombilla externa (60W): LR-m3 y POF2.....	31
Figura 26. Intensidad y temperatura en función del tiempo de la fibra LR-m3 siguiendo 4 ciclos de temperatura (30°C-90°C).....	33
Figura 27. Espectro de emisión de la fibra TR a 30 °C.....	33
Figura 28. Intensidad y temperatura en función del tiempo de la fibra TR siguiendo 4 ciclos de temperatura (30°C-90°C).....	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades principales de las fibras estudiadas. e: método de extrusión y m: método de molde utilizado para producir las preformas.	13
Tabla 2. Características de la célula de referencia modelo 15151 de Abet Technologies utilizada para calibrar el simulador solar.	15
Tabla 3. Parámetros utilizados en cada tanda de medidas; $z_n = 3,3$ cm (z_e : longitud de la fibra iluminada; z_n : longitud del conector).	19
Tabla 4. Parámetros utilizados en cada tanda de medidas; $z_n = 3,3$ cm (z_e : longitud de la fibra iluminada; z_n : longitud del conector).	22
Tabla 5. Propiedades de los espectros de emisión de las fibras estudiadas con el simulador solar.	25
Tabla 6. Valores del ajuste de la curva experimental del primer y segundo periodo de la figura 21 con la Ecuación (6). R^2 es el coeficiente de determinación del ajuste. ...	29
Tabla 7. Propiedades de los espectros de emisión en función de la temperatura..	32

LISTA DE ACRÓNIMOS

PV.....	Fotovoltaica
FLSC.....	Concentrador solar luminiscente de fibras
APB.....	Applied photonics Bilbao
RTG.....	Generador de radioisótopos
LSC.....	Concentrador solar luminiscente
PMMA.....	Polimetilmetacrilato
POF.....	Fibra óptica de polímero
UV.....	Ultravioleta
AM.....	Masa de aire
LEO.....	Órbita terrestre baja
GEO.....	Órbita terrestre geoestacionaria
LR.....	Lumogen red
UPV/EHU.....	Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
FWHM.....	Anchura a media altura

1. INTRODUCCIÓN

La carrera espacial que disputaron Estados Unidos y la Unión Soviética el siglo pasado no habría ocurrido tal como la conocemos de no ser por el desarrollo de las células solares, y viceversa, el desarrollo de las células solares no habría sido tan espectacular sin el telón de fondo de la carrera espacial. El Vanguard I (1958) fue el cuarto satélite puesto en órbita de la historia, tras los Sputnik I y II y el Explorer I, además del primer satélite alimentado con energía solar. Dejó de transmitir en 1964, cuando sus últimas células fotovoltaicas (PVs) se agotaron, pero a día de hoy sigue siendo el satélite artificial más antiguo presente en el espacio. A partir de ese momento, la célula de silicio entró en el escenario de la industria y empezó el desarrollo de tecnologías en la producción.

Al mismo tiempo que EEUU y la URSS pugnaban por la conquista del espacio, en otra área tecnológica estaba sucediendo una revolución. En 1952 se inventó la fibra óptica, aunque los usos que se le dio eran diferentes a los actuales. En 1966 se produjo un antes y un después en la investigación de este material gracias a un estudio de Kao y Hockman en el que señalaban que las pérdidas que sufría la fibra óptica no eran inherentes a las propiedades de la fibra, sino a las imperfecciones del material. Si se mejoraba el material, podrían retirarse las imperfecciones y con ellos los obstáculos para la comunicación óptica. Hoy en día, utilizamos la fibra óptica para internet, telecomunicaciones, aeronáutica, biomedicina, etc., y cuando la fibra óptica esta dopada se extiende su uso a láseres, amplificadores ópticos, sensores e incluso como concentradores solares.

Esta unión entre energía solar y fibra óptica da como resultado a los concentradores solares de fibras luminiscentes (FLSCs). Un concentrador solar, como pueden ser una lente o un disco parabólico, es un sistema óptico de captación de energía solar que concentra la luz solar incidente en su superficie en un área más pequeña de células PVs, reduciendo el tamaño de células necesarias y, por tanto, su coste. En los FLSCs se utiliza fibra óptica de polímero dopada con materiales luminiscentes como concentrador solar. La fibra dopada absorbe la luz solar incidente y transmite la emisión generada hasta los bordes de la fibra donde se colocan las células PVs.

A pesar de la gran cantidad de trabajos de investigación sobre los FLSCs que se publican actualmente, éstos se limitan, en general, a la superficie terrestre. El grupo de investigación “*Applied Photonics Bilbao*” (APB) investiga en el área de los FLSCs desde 2017. Además de su experiencia investigadora en fibras dopadas, el grupo fabrica sus propias fibras de polímero dopadas en la torre de estirado que posee lo cual le permite disponer de fibras propias para ser analizadas. En este trabajo se estudia de forma experimental la viabilidad de utilizar fibras dopadas como concentradores solares en entornos espaciales. En concreto, la degradación en la emisión que sufren las fibras debido a la radiación solar y a la temperatura.

2. CONTEXTO

2.1. Energía Solar

Durante el año pasado, tan solo el 5% del consumo energético mundial procedió de fuentes renovables (no se incluye la energía hidroeléctrica) [1]. Sin embargo, éstas han crecido en los últimos 10 años en torno a un 16% cada año, siendo la energía solar la que más aumenta debido, en parte, a su abundancia y alta disponibilidad en todo el mundo. En 2019 la energía solar supuso el 26% del consumo mundial de energía renovable.

Si bien la generación de energía solar en la superficie terrestre supone un porcentaje mínimo de la generación total, en el espacio la principal fuente de energía es el Sol. Se pueden utilizar otras fuentes como el generador de radioisótopos (RTG) aunque éstos se limitan a misiones de espacio profundo donde la radiación solar es considerablemente menor y donde no existen preocupaciones medioambientales por poner en órbita terrestre material radioactivo. Para naves espaciales que orbitan más cerca del Sol como pueden ser los satélites en órbita terrestre, la generación de energía con paneles solares es la más utilizada. Aunque el estudio de las células fotovoltaicas (PV) ha avanzado considerablemente, todavía es difícil producir energía solar de manera eficiente.

Una posible solución para aumentar la eficiencia en el sistema de captación de energía solar es concentrar la luz solar en un área más pequeña de células PVs utilizando concentradores solares. Éstos pueden ser concentradores geométricos, como lentes o discos parabólicos, o concentradores luminiscentes, como las fibras ópticas dopadas.

2.2. Concentradores Solares Luminiscentes

El concentrador solar luminiscente (LSC) fue propuesto por primera vez en 1970 como una fuente de energía alternativa a las placas solares [2]. Estos concentradores solares utilizan un medio luminiscente para absorber la radiación solar y una guía de onda que la confina y, por reflexión interna total, la transporta hasta los extremos donde se colocan las células PV. El uso de polímeros transparentes (PMMA) baratos son materiales de base para su creación (ver figura 1).

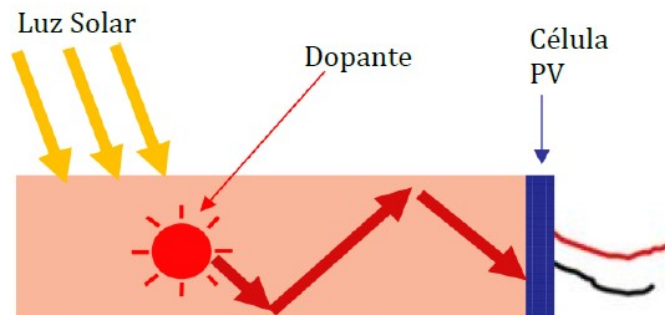


Figura 1. Diagrama de un concentrador solar luminiscente (LSC).

Algunas de las ventajas que proporcionan los LSCs son una captación de luz solar a diferentes ángulos, mejor disipación de calor distribuida sobre una superficie mayor, menor coste económico y mayor ligereza que un panel PV. Para aplicaciones en el Espacio, en muchas ocasiones, el coste de los materiales no es un factor determinante a la hora de seleccionar una tecnología u otra, pero el peso sí que lo es ya que influye más en el coste económico total del lanzamiento de un satélite.

Tradicionalmente, los LSCs han tenido una configuración planar, lo que implicaba grandes limitaciones en el acoplamiento entre los bordes y la célula PV. Sin embargo, varios estudios han demostrado que una geometría cilíndrica puede resolver este inconveniente, e incluso mostrar una mayor capacidad de concentrar la luz [3][4]. En estos dispositivos, la fibra óptica de polímero (POF) dopada con materiales luminiscentes absorbe la luz solar incidente desde su superficie lateral exterior y transmite la emisión generada hasta los bordes de la fibra donde se colocan las células PV (ver figura 2) [5][6][7]. A este nuevo LSC con forma cilíndrica se le denomina concentrador solar de fibra luminiscente (FLSC) y es un campo muy estudiado en los últimos años [8][9][10].

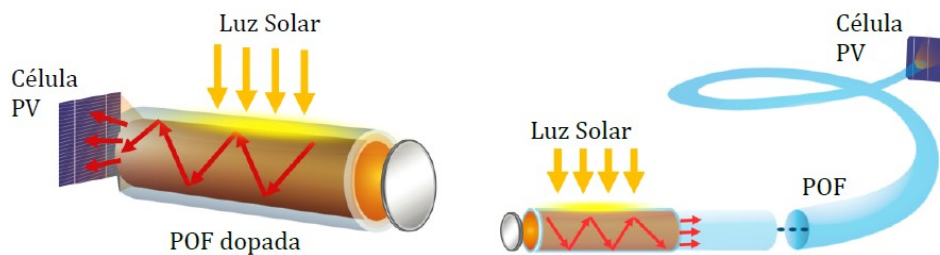


Figura 2. Dibujo representativo de un concentrador solar compuesto por una fibra óptica de polímero luminiscente.

También existen varios trabajos de investigación en los que se han estudiado los LSCs para aplicaciones en entornos espaciales y en los que se destaca su **bajo peso** comparado con los paneles solares convencionales [11][12].

2.3. Condiciones ambientales en el espacio

La falta de una atmósfera protectora hace del espacio un entorno inhóspito y peligroso en el que existen diferentes tipos de partículas que pueden ocasionar daños en las naves espaciales. El ambiente espacial cercano a la Tierra las expone a **altas y bajas temperaturas, radiación solar**, oxígeno atómico, protones y electrones, plasma espacial, micrometeoroides, basura espacial, etc. Los fotones de la radiación UV, los neutrones energéticos y el oxígeno atómico, entre otros, pueden ocasionar erosión en la superficie de una nave espacial degradando las propiedades térmicas, eléctricas u ópticas, entre otras, de los componentes en contacto con el ambiente espacial tales como polímeros orgánicos [13][14].

Se ha estudiado la resistencia a la radiación de algunos materiales luminiscentes para utilizarlos como LSCs en entornos espaciales concluyendo que la rodamina 6G, un colorante luminiscente, tiene un buen comportamiento frente a la radiación ionizante y abriendo las puertas a los LSCs como futura alternativa a los paneles PV tradicionales en entornos espaciales [15].

2.3.1. Radiación solar

En este trabajo se ha estudiado la degradación que sufren algunas fibras ópticas dopadas debido a la radiación solar emitida por el Sol. La radiancia solar calculada fuera de la atmósfera de la Tierra es de aproximadamente 1353 W/m^2 . Debido a la atmósfera terrestre, parte de la radiación solar es absorbida o reflejada y la radiancia que llega a la superficie es de aproximadamente 970 W/m^2 . Esta reducción en la potencia de la luz se cuantifica mediante el concepto de masa de aire (AM). La masa de aire es la longitud del camino tomado por la luz a través de la atmósfera normalizado a la ruta más corta posible (es decir, cuando el sol está directamente vertical) y se define como:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

donde θ es el ángulo de la vertical (ángulo cenital). Cuando el sol está directamente vertical, la masa de aire es 1.

Para poder comparar de manera exacta la eficiencia de diferentes células solares medidas en diferentes lugares y momentos, se ha definido una densidad espectral y potencia estándar para la radiación tanto fuera de la atmósfera como en la superficie terrestre. El espectro estándar fuera de la atmósfera se conoce como AM0 (1353 W/m^2) y el de la superficie terrestre como **AM1.5G**, el cual se normaliza a 1000 W/m^2 (ver figura 3).

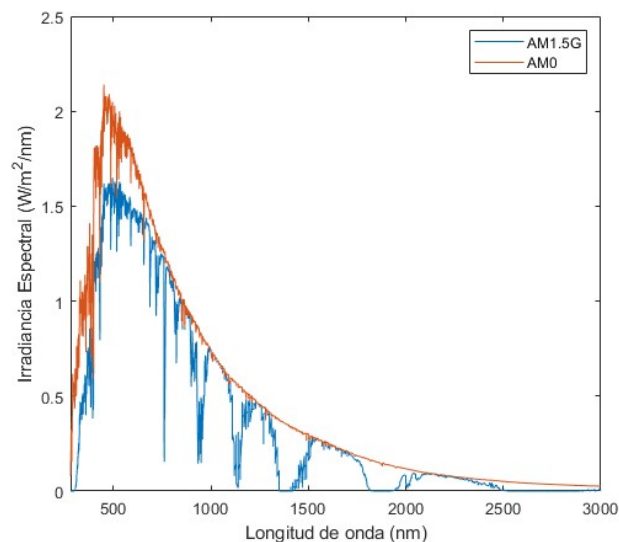


Figura 3. Espectro solar estándar en la superficie terrestre y en el espacio.

2.3.2. Temperatura

Otro factor a tener en cuenta en cuanto a la pérdida de eficiencia tanto de las células solares como de los concentradores solares son las altas temperaturas que estas alcanzan en el espacio. Debido a la ausencia de atmósfera, el calor no puede transferirse por convección ni conducción, sólo por radiación. Una nave espacial en órbita y sus paneles solares pueden ser calentados por múltiples fuentes de calor. El sol y la Tierra son las fuentes primarias; los paneles solares reciben radiación directa del Sol, radiación emitida por la Tierra y radiación reflejada por la Tierra (albedo). Además, los paneles solares también emiten radiación al espacio.

Las condiciones de temperatura que sufre una nave espacial varían según la órbita en la que se encuentre. Las órbitas más utilizadas alrededor de la Tierra son la órbita terrestre baja (LEO) y la geoestacionaria (GEO). Los satélites LEO suelen tener órbitas circulares de entre 160 y 1.500 km de altura sobre la superficie terrestre con periodos de revolución de **entre 90 y 120 minutos**, mientras que los satélites GEO suelen tener órbitas circulares en el plano ecuatorial a una distancia aproximada de 36.000 km de la superficie terrestre con periodos de revolución de un día sidéreo de duración (23 horas y 56 minutos).

Dependiendo del tipo de órbita las variaciones de temperatura de un satélite son diferentes. Por un lado, cuanto más lejana es una órbita, más cerca se encuentra del Sol y, por lo tanto, recibe más radiación solar. Además, cuanto más lejana es la órbita el porcentaje del tiempo que el satélite se encuentra en eclipse es menor ya que la sombra que proyecta la Tierra se reduce. Por otro lado, en una órbita cercana a la Tierra la radiación solar reflejada por la Tierra (albedo) y la emitida por el propio planeta son mayores.

Existen simulaciones realizadas para calcular las variaciones de temperatura que sufren los paneles solares de un satélite en LEO (300 km) y GEO (35786 km) [16]. En la figura 4 se muestra la variación de la temperatura en función del tiempo de los diferentes componentes de un panel solar en LEO. La línea continua de color negro (“P up” en la leyenda) corresponde con la parte de arriba, la expuesta directamente al Sol, del panel solar. Este punto del panel solar varía entre 379,7 K (106,7 °C) y 242 K (-31 °C). Cabe mencionar que las células solares no alcanzan tales temperaturas debido a que suelen protegerse con materiales transparentes como el vidrio.

Se han estudiado los efectos de la temperatura en un LSC dopado con el colorante rodamina 6G calentándolo hasta los 74 °C en varios ciclos observando, que al enfriar la muestra, se producía una recuperación del daño térmico sufrido al calentarla [17]. A parte de ese trabajo, apenas hay trabajos que estudien el comportamiento de los LSCs frente a la temperatura. Éste es uno de los motivos por los que se ha realizado este trabajo.

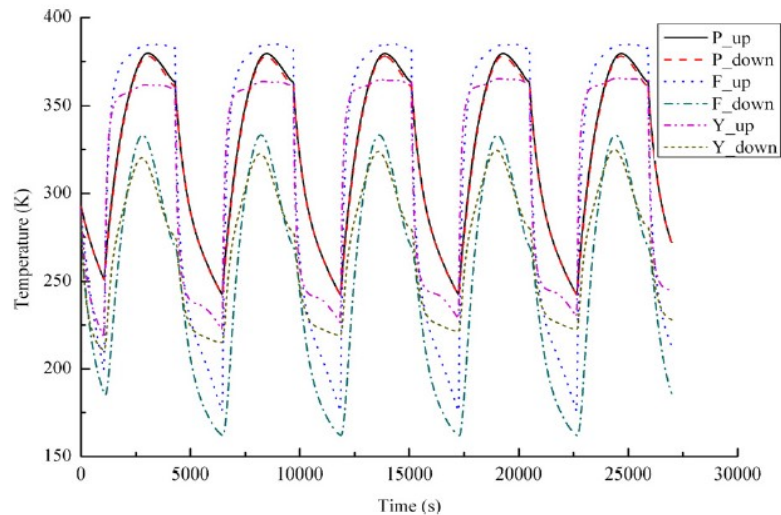


Figura 4. Gráfico de la temperatura en función del tiempo de ciertos puntos de cada componente de un panel solar: 5 periodos de una órbita terrestre baja. Figura tomada de [16].

3. OBJETIVOS

En este trabajo se han estudiado los efectos de la radiación solar y de la temperatura en los FLSCs, tratando de simular el comportamiento que tendrían en una órbita terrestre baja. Las diferentes fibras estudiadas se han expuesto a radiación solar y calentado hasta una **temperatura de 90 °C** ya que la temperatura de transición vítrea del PMMA es de 105 °C. Ésta se define como la temperatura a la cual el polímero o elastómero adquiere propiedades características de estado vítreo como fragilidad y rigidez.

Debido al interés que suscitan las FLSCs en la actualidad, lo poco que se han estudiado para aplicaciones en entornos espaciales, sobre todo en referencia al comportamiento frente a la temperatura, y el potencial que tiene esta tecnología para ser utilizada en el espacio en el futuro, el presente trabajo tiene como objetivo principal **estudiar la viabilidad de utilizar los FLSCs en entornos espaciales.**

Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Determinar la fotoestabilidad de la señal emitida por varios FLSCs durante varias horas y/o en varios ciclos de iluminación/oscuridad utilizando un simulador solar calibrado (AM1.5G) en el laboratorio.
- Comparar la fotoestabilidad de la señal emitida por varios FLSCs de lumogen red (LR) de diferentes concentraciones y métodos de obtención de las preformas.
- Determinar la fotoestabilidad de la señal emitida por varios FLSCs en función de la temperatura, utilizando un horno en el laboratorio.
- Determinar la fotoestabilidad de la señal emitida por varios FLSCs en varios ciclos térmicos simulando una órbita terrestre baja, utilizando un horno en el laboratorio.

4. BENEFICIOS DEL TRABAJO

Las ventajas del uso de la tecnología de POFs unido a su bajo coste, fácil manipulación y estandarización, así como un mejor acoplamiento entre la fibra fluorescente y las células PV, han convertido a las fibras ópticas de polímero en unas candidatas ideales en el desarrollo de los concentradores solares. Para ello, resulta necesario el estudio de nuevos concentradores solares basados en fibras. Teniendo en cuenta todos estos factores, podemos considerar que los principales beneficios del trabajo son los siguientes:

- Conocer por medio de un estudio experimental cómo se comportan las fibras dopadas a **altas temperaturas** sirviendo como referencia para futuras investigaciones.
- A largo plazo, los FLSCs pueden ser una **alternativa competitiva** a los paneles solares convencionales en el sector espacial debido a las cualidades que éstos presentan como la flexibilidad, ligereza, versatilidad y bajo coste.
- El estudio térmico realizado en este trabajo de concentradores solares formados con diferentes fibras de polímero luminiscentes supone siempre un avance en el aprovechamiento de la energía de la radiación solar que es una de las **energías renovables** o energías limpias, que podrían ayudar a resolver algunos de los problemas más urgentes que afronta el mundo en la búsqueda de fuentes de energía alternativas.

5. METODOLOGIA

A continuación se detallan las características de las fibras dopadas estudiadas, los montajes experimentales diseñados para estudiar los efectos de la radiación solar y la temperatura en los FLSCs, y el procesamiento de datos correspondiente.

5.1. Fibras analizadas

En la tabla 1 se describen las propiedades principales de las fibras dopadas analizadas en este trabajo.

Código fibra	Material	Dopante	Concentración dopante (%)	Diámetro (mm)	Tipo de fibra	Fabricación
LR-e1	PMMA	Lumogen F Red 305	0,003	0,95±0,05	Sin revestimiento	APG Bilbao
LR-m1	PMMA	Lumogen F Red 305	0,003	0,91±0,01	Sin revestimiento	APG Bilbao
LR-m2	PMMA	Lumogen F Red 305	0,01	1,01±0,01	Sin revestimiento	APG Bilbao
LR-m3	PMMA	Lumogen F Red 305	0,03	0,93±0,01	Sin revestimiento	APG Bilbao
CO	PMMA	F8BT	0,003	1±0,01	Sin revestimiento	Luceat (Italia)
TR	PMMA	EU (TFFA) ₃ Phen	0,003	1±0,01	Con revestimiento	Brunswick (Alemania)
POF	PMMA	-	-	1±0,01	Sin revestimiento	APG Bilbao

Tabla 1. Propiedades principales de las fibras estudiadas. e: método de extrusión y m: método de molde utilizado para producir las preformas.

La fibra CO fue fabricada en la empresa italiana Luceat y está dopada con el polímero conjugado F8BT. La fibra TR fue fabricada en la Universidad Técnica de Brunswick en Alemania, dispone de revestimiento y está dopada con el material metálico-orgánico EU(TFFA)₃Phen, basado en la tierra rara Europio.

El resto de las fibras han sido fabricadas en la **torre de estirado** de la que el Grupo de Investigación “*Applied Photonics Bilbao*” dispone en el Campus de UPV/EHU en Leioa (Bizkaia) (ver figura 5). Esta torre es única en España y coloca al grupo en una situación idónea para fabricar y disponer de la fibra óptica deseada.



Figura 5. Torre de estirado del Grupo de Investigación “Applied Photonics Bilbao”.

En el proceso de fabricación de FLSCs se pueden diferenciar dos etapas: el diseño y obtención de la preforma, la cual determina las propiedades fundamentales de la fibra, y el estirado de la preforma a fibra, realizado en la torre de estirado y que determina el diámetro de la fibra (ver figura 6). Las preformas de las fibras estudiadas han sido producidas de dos formas distintas: por **extrusión** y por **molde**.

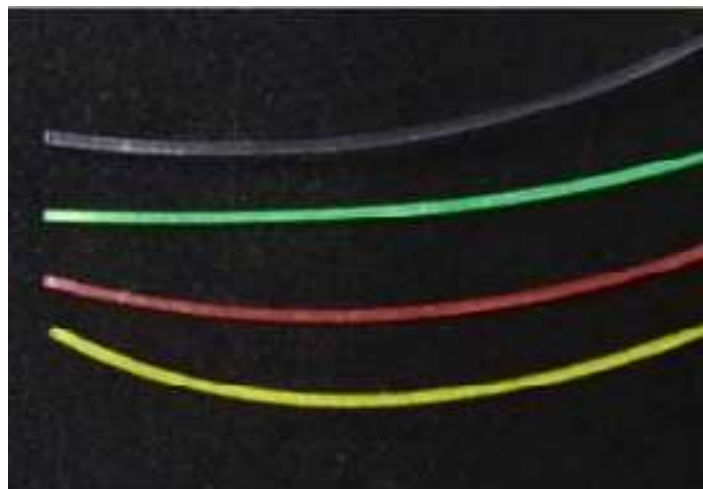


Figura 6. Varias muestras de fibras ópticas luminiscentes fabricadas en la torre de estirado del APB.

5.2. Montajes experimentales

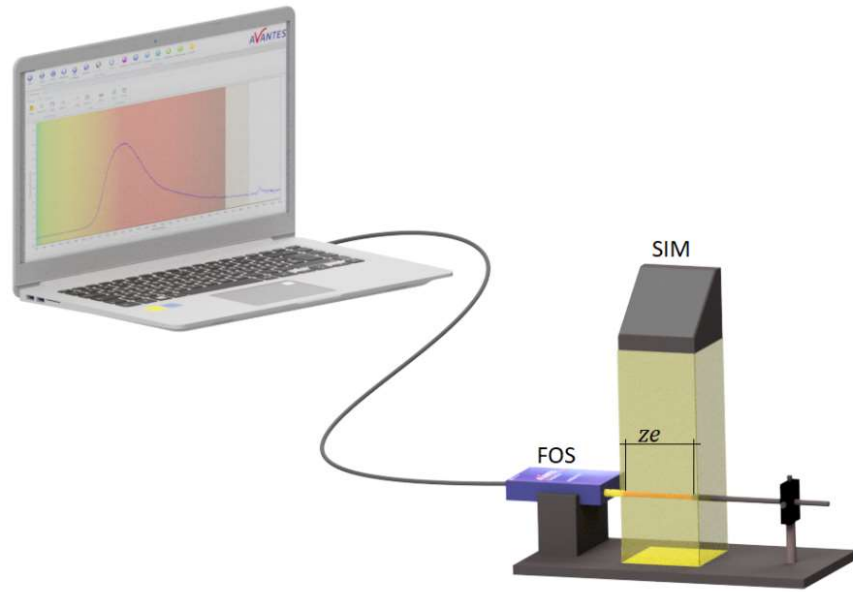
5.2.1. Efecto de la radiación solar en FLSCs en la superficie terrestre (AM1.5G)

La figura 7 muestra el esquema del sistema diseñado para analizar el efecto de la radiación solar en los FLSCs. Se dispone de un simulador solar *SunLite* modelo **11002 de Abet Technologies** equipado con una lámpara de Xenon de 100 W y un filtro que simulan la radiación solar en la superficie terrestre, un soporte para la fibra a estudiar, un termopar y un espectrómetro *Avantes* modelo *AvaSpec-Mini* conectado a ésta. El parámetro z_e representa la longitud de la fibra iluminada y z_n la distancia de propagación de la luz desde la parte iluminada de la fibra hasta la entrada del espectrómetro.

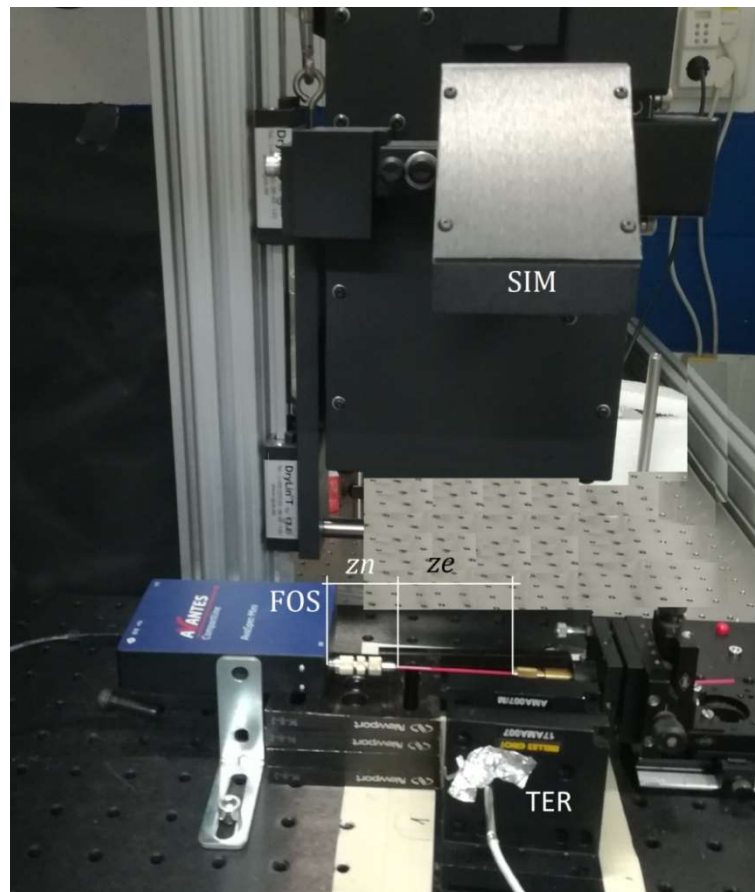
El simulador solar está calibrado mediante una célula solar de referencia de *Abet Technologies* modelo **15151** para iluminar en la fibra con la intensidad espectral estándar en la superficie terrestre (1000 W/m^2 y AM 1.5G). El simulador solar permite ajustar la altura de la lámpara a fin de realizar la calibración. En la tabla 2 se muestran las características de la célula de referencia:

Célula de referencia modelo 15151	
Dimensiones	10x10 mm
Calibración	1 sol AM 1.5G
Voltaje	100 mV
Error calibrado	6 %

Tabla 2. Características de la célula de referencia modelo 15151 de Abet Technologies utilizada para calibrar el simulador solar.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Esquema e (b) imagen del montaje experimental del simulador solar. Leyenda: SIM: Simulador solar; FOS: Espectrómetro de fibra óptica; TER: Termopar. z_e representa la longitud de la fibra iluminada y z_n la distancia de propagación de la luz.

Una vez calibrado el simulador solar se coloca la fibra en el soporte y mediante un conector de fibra óptica se conecta la fibra al espectrómetro, y este al ordenador (detalle del soporte para la fibra y conexión al espectrómetro en la figura 8). También se ha colocado un termopar al lado de la fibra para monitorizar la temperatura y recopilar la información en un dispositivo USB que más tarde se ha descargado en el ordenador (ver figura 9).

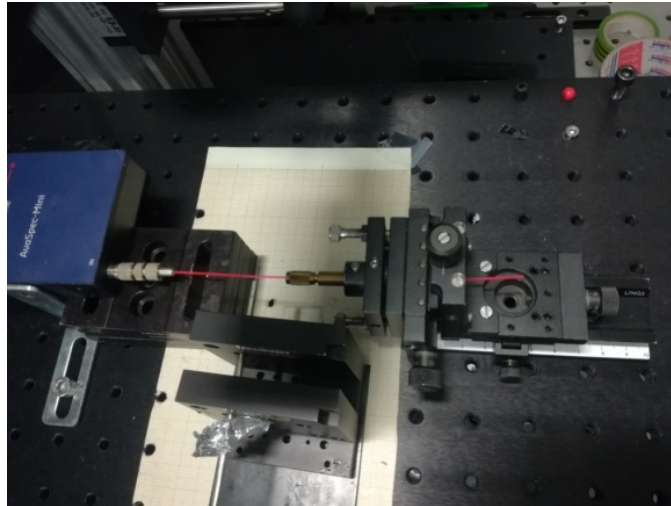


Figura 8. Detalle del soporte para la fibra y conexión al espectrómetro.

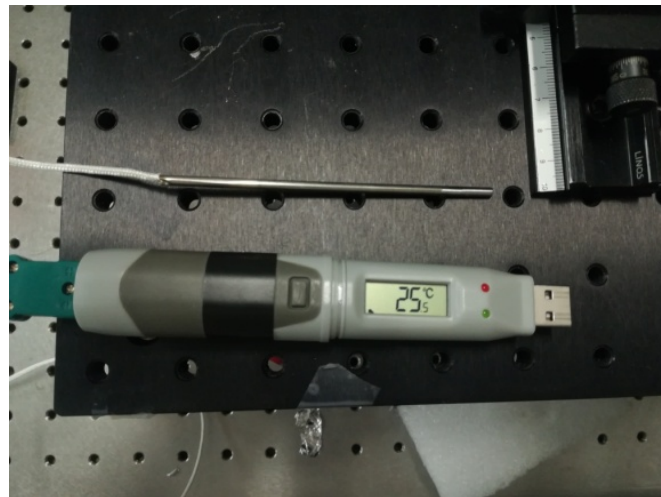


Figura 9. Termopar y conector USB con display utilizados para monitorizar la temperatura de la fibra.

Se ha utilizado el software *Avasoft 8*, incorporado con el detector de *Avantes* modelo *AvaSpec-Mini*, para realizar las medidas. En la figura 10 se muestran dos espectros obtenidos con el software a modo de ejemplo. En el espectro 2D se representan el número de cuentas detectadas por el espectrómetro en función de la longitud de onda. En el espectro 3D, además, se puede ver la evolución del espectro en el tiempo de 3 ciclos LEO con el simulador solar.

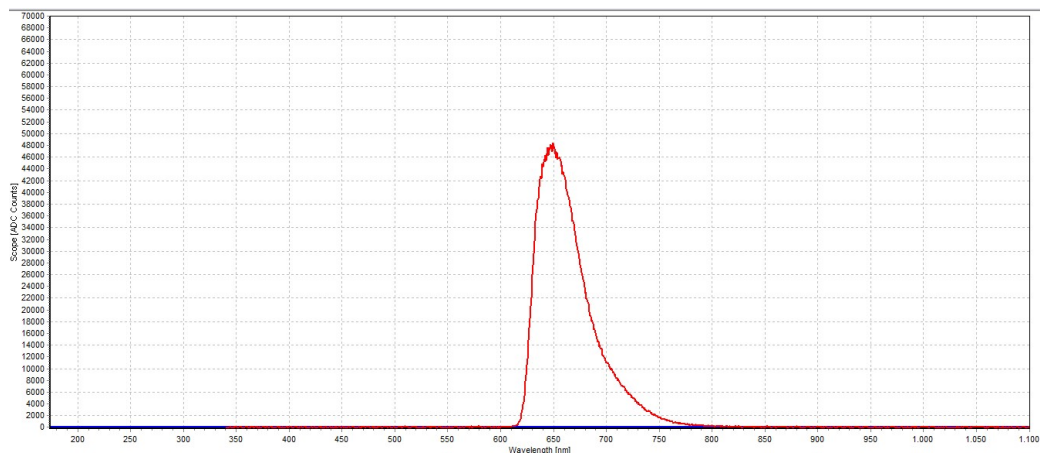
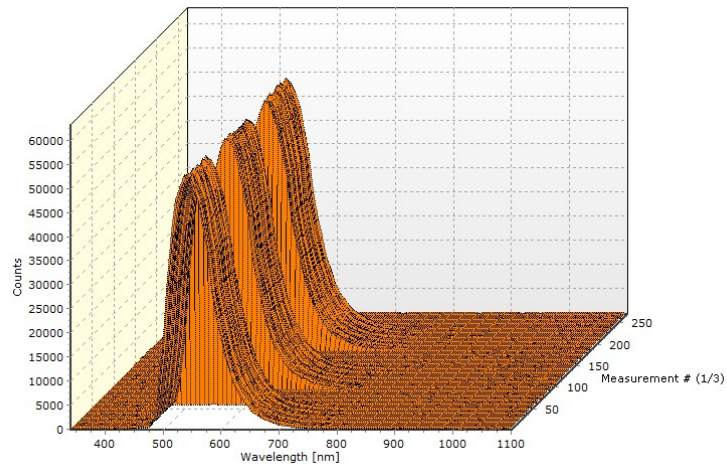


Figura 10. Ejemplos de visualización de espectros 3D y 2D del software de Avantes Avasoft 8.

Para realizar correctamente estos experimentos la fibra sólo puede recibir radiación de la lámpara solar, por lo tanto, ha sido necesario que el resto del laboratorio permaneciera a oscuras mientras se realizaban las mediciones. Por este motivo se realizaban por la tarde, cuando ya no había gente en el laboratorio. Si era necesario dejar la lámpara solar encendida fuera del horario del centro se programaba el apagado automático de ésta.

Se han realizado 3 experimentos diferentes con la disposición mostrada en el esquema de la figura 7.

- a) En el primer experimento se han expuesto las diferentes fibras a la lámpara solar durante **12 horas** simulando un día terrestre. Se ha grabado una imagen del espectro emitido por la fibra cada 10 minutos, en total 73 medidas.
- b) En el segundo, las fibras a analizar han soportado 3 ciclos de 54 minutos de exposición a la lámpara solar y 34 minutos de oscuridad que simulan una **órbita LEO**. Se ha grabado una imagen del espectro emitido por la fibra cada minuto, en total 271 medidas.

- c) Y en el tercero, las fibras han sido expuestas a **2 ciclos de 16 horas** de luz y 8 horas de oscuridad. Se ha grabado una imagen del espectro que emitía la fibra cada 10 minutos, en total 289 medidas.

Por último, para cada una de las tandas de medidas, se ha establecido un tiempo de integración para el espectrómetro de modo que éste no se saturase y se ha medido el “dark” del laboratorio con las luces apagadas, para realizar la medida normalizada.

A continuación, en la tabla 3, se detallan los parámetros (descritos anteriormente) utilizados para cada una de las tandas de medidas.

Experimento	Fibra analizada	z_c (cm)	Tiempo integración (ms)	Average (scans)	Número medidas	Intervalo entre medidas (min)
12 horas	LR-m1	5	2	1	73	10
	LR-m2	5	1,3	1	73	10
	LR-m3	3	1,05	1	73	10
	LR-e1	5	10	1	73	10
Ciclos LEO	LR-m2	5	1,3	1	271	1
	LR-m3	3	1,05	1	271	1
	F8BT	5	5	1	271	1
Ciclos 16 horas	LR-m3	3	1,05	1	289	10

Tabla 3. Parámetros utilizados en cada tanda de medidas; $z_n = 3,3$ cm (z_c : longitud de la fibra iluminada; z_n : longitud del conector).

5.2.2. Efecto de la temperatura en FLSCs

Las figura 11 muestra el esquema del sistema diseñado para analizar el efecto de la temperatura en FLSCs. Se dispone de un horno *CTS* modelo *C-70/200*, una bombilla para horno de 50 W y otra de 60 W, la fibra a estudiar y una fibra óptica conectada a la muestra que transmite la luz emitida hasta el espectrómetro *Ocean Optics* modelo *USB2000*. Se han utilizado dos bombillas diferentes para los experimentos en el horno (ver figura 12). El horno dispone de una serie de aberturas que se utilizan para introducir elementos externos: termopares o fibras por un lateral, y bombillas por la parte superior (ver figura 13).

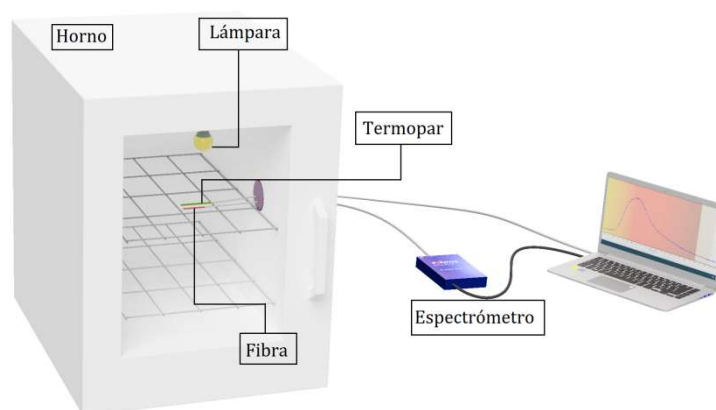


Figura 11. Esquema del montaje experimental para estudiar los efectos de la temperatura en FLSCs.

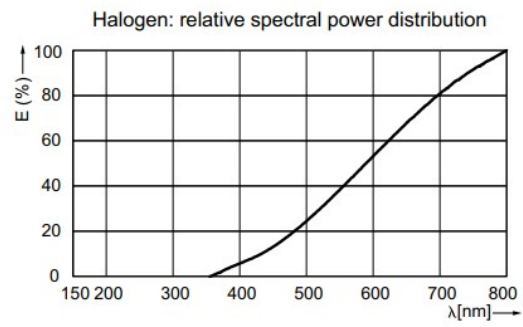


Figura 12. Espectro de emisión de la bombilla interna del horno (PHILIPS 50W GU5.3 12V).

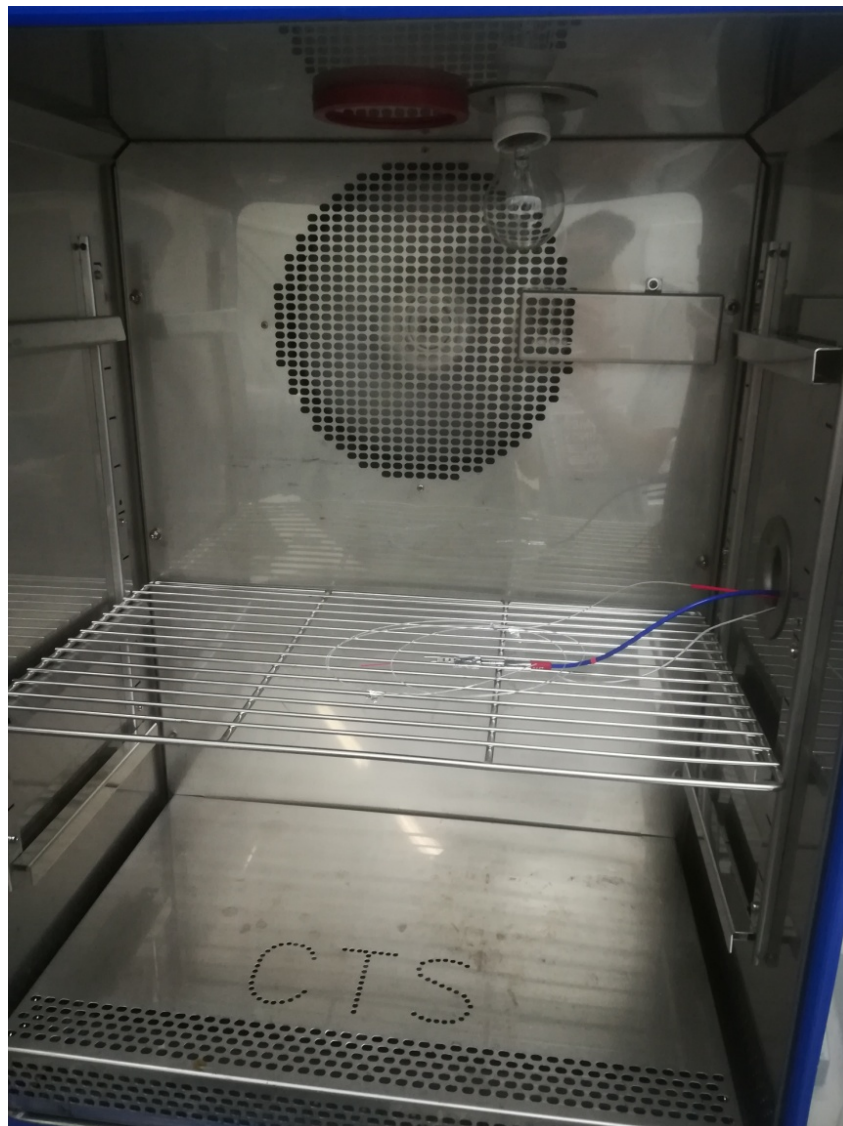


Figura 13. Imagen del interior del horno donde se aprecian la disposición de los elementos introducidos por las aberturas lateral y superior.

Antes de iniciar los experimentos se ha calibrado el horno. Éste dispone de un termostato interno y además se ha introducido un termopar para obtener una doble lectura de la temperatura. Se ha observado una diferencia entre las dos lecturas no superior a 1 °C entre 30 y 90 °C de temperatura. Se ha colocado un termopar en el horno, cerca de la muestra, para monitorizar su temperatura (ver figura 14). Los datos se han almacenado en un dispositivo USB que más tarde se ha descargado en el ordenador.



Figura 14. Detalle de la disposición en el horno del termopar y la fibra.

Para realizar las medidas de los espectros de emisión se ha utilizado el software *Spectra Suite* asociado al espectrómetro *Ocean Optics*.

Se han realizado 2 experimentos diferentes con la disposición mostrada en el esquema de la figura 11.

- a) En el primer experimento se han calentado las diferentes fibras en el horno **desde 30 °C hasta 90 °C** subiendo la temperatura 10 °C cada 20 minutos, dando así tiempo a la fibra a termalizar y permanecer estable a la temperatura del horno.
- b) En el segundo, las fibras a analizar han soportado **4 ciclos** que han consistido en calentar la fibra desde 30 °C hasta 90 °C, permanecer 40 minutos a dicha temperatura y enfriarla otra vez hasta 30 °C, simulando en lo posible una órbita LEO. Se ha grabado una imagen del espectro emitido por la fibra cada minuto.

Igual que en los experimentos anteriores, para cada una de las tandas de medidas se ha establecido un tiempo de integración para el espectrómetro de modo que éste no se saturase y se ha medido el “dark” dentro del horno con la bombilla apagada.

A continuación, en la tabla 4, se detallan los parámetros (descritos anteriormente) utilizados para cada una de las tandas de medidas.

Experimento	Fibras analizadas	z_e (cm)	Tiempo integración (ms)	Average (scans)	Número medidas	Intervalo entre medidas (min)
Rampa Temperatura 30-90 °C	LR-m1	5,4	750	1	121	1
	LR-m3	5,4	200	1	121	1
	LR-e1	5,4	2.000	1	7	20
	POF	184	2.000	1	121	1
Ciclos LEO 90 °C	LR-m3	5,4	1.000	1	363	1
	EU	5,4	5.000	1	376	1

Tabla 4. Parámetros utilizados en cada tanda de medidas; $z_n = 3,3$ cm (z_e : longitud de la fibra iluminada; z_n : longitud del conector).

5.3. Procesado de datos

Tras finalizar cada tanda de medidas se ha obtenido un documento de texto por cada medida realizada por el software del espectrómetro (ver figura 15) y otro para todas las medidas del termopar. Se ha realizado un pequeño programa con *Python* que copia los datos requeridos de cada documento de texto y los pega en un archivo nuevo de tal manera que al exportarlo a Excel se puedan procesar con mayor facilidad (ver código en Anexo 1).

```

1611089M1_09jun.20_170427_0001.Rwd8: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
|
Integration time [ms]: 2,000
Averaging Nr. [scans]: 1
Smoothing Nr. [pixels]: 0
Data measured with spectrometer [name]: 1611089M1
Wave ;Sample ;Dark ;Reference;Scope Corrected for Dark
[nm] ;[counts] ;[counts] ;[counts]

340,73; -26,246; -7,037; 0,000;-19,20868
341,34; 9,269; 15,978; 0,000;-6,70882
341,94; 11,371; -1,019; 0,000;12,38951
342,55; -7,018; 39,970; 0,000;-46,98743

```

Figura 15. Ejemplo de documento de texto creado por el espectrómetro con una cabecera y 5 columnas de datos. Para el procesado de datos se utilizan las columnas de longitud de onda (1) y cuentas corregidas por “dark” (5).

El espectrómetro tiene un rango de longitudes de onda de entre 341 y 1100 nm. El objetivo del procesado de datos es calcular la intensidad total de cada espectro obtenido, que corresponde con el área bajo la curva del espectro (ver figura 16):

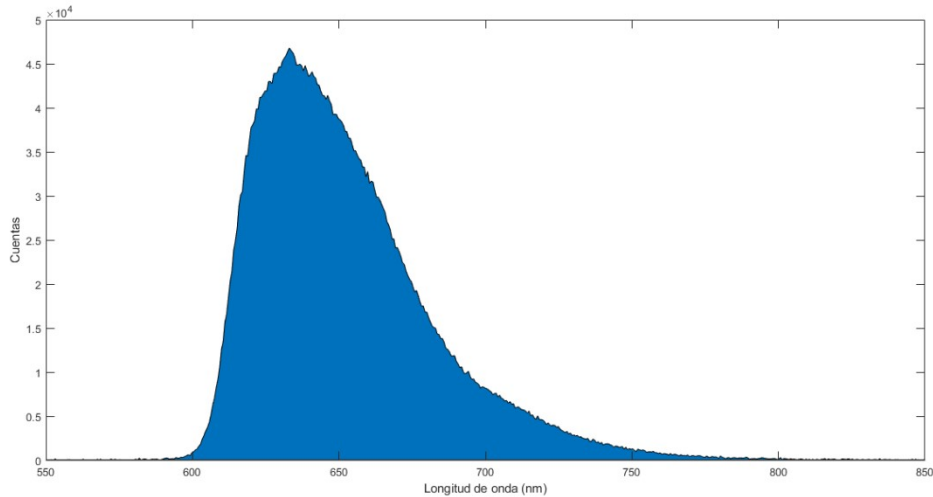


Figura 16. Ejemplo de espectro obtenido con espectrómetro. La zona de azul es el área a calcular que corresponde con la Irradiancia total (u.a).

$$\text{Área} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \quad (\text{u.a}) \quad (2)$$

Siendo λ la longitud de onda e I el número de cuentas.

Una vez se ha calculado el área para todas las mediciones realizadas, se han normalizado los resultados de tal manera que el valor de la irradiancia de la primera medida realizada sea 100.

Por último se han añadido los valores del termopar, se han exportado los datos a un documento de texto y se han realizado las gráficas mediante el programa **MATLAB**.

5.3.1. Análisis del espectro de emisión

Se han calculado la longitud de onda media y la anchura a media altura de cada espectro obtenido. La longitud de onda media se ha obtenido de la siguiente manera:

$$\lambda_m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot I(\lambda) d\lambda}{\text{Área}} \quad (\text{nm}) \quad (3)$$

La anchura a media altura o FWHM (por sus siglas en inglés Full Width at Half Maximum) mide la extensión del espectro. En la figura 17 se muestra el concepto de FWHM:

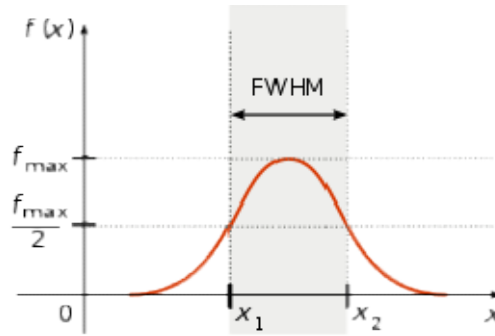


Figura 17. Concepto de anchura a media altura o FWHM.

Para una distribución gaussiana la FWHM se suele relacionar con la desviación estándar mediante la siguiente ecuación:

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \quad (4)$$

La desviación estándar del espectro de emisión viene definida por la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - \lambda_m)^2 \cdot I(\lambda) d\lambda}{\text{Área}}} \quad (nm) \quad (5)$$

5.3.2. Ajustes de los decaimientos (temporales)

En uno de los experimentos se ha realizado un ajuste exponencial a los datos obtenidos con el fin de analizar el comportamiento temporal de la intensidad emitida por las fibras. Se ha utilizado el software *Table Curve 2D v5.01* de *Systat Software Inc.* el cual permite realizar ajustes lineales y no lineales a múltiples funciones (ver figura 18).

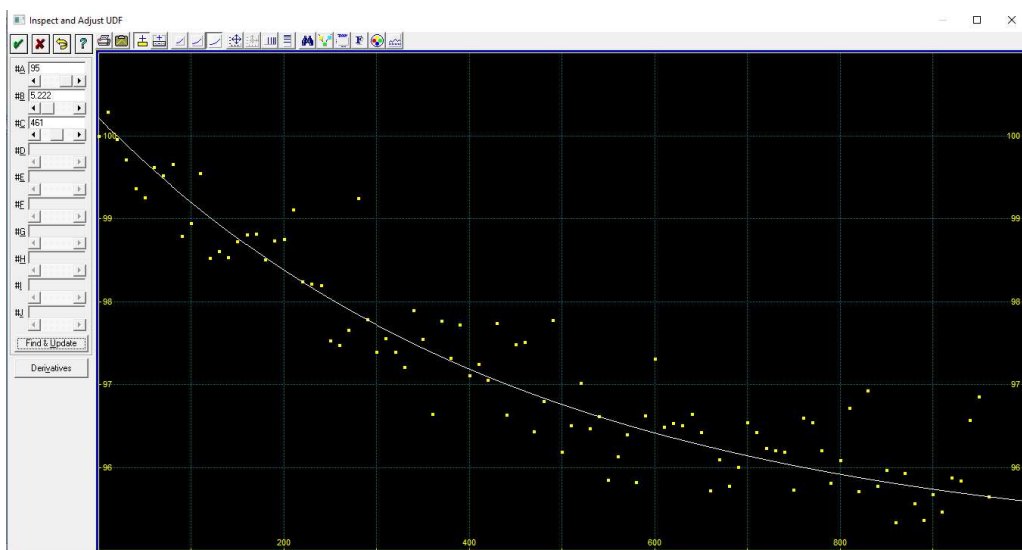


Figura 18. Ejemplo de ajuste de la Ec. (6) con la herramienta *Table Curve 2D* de *SYSTAT*.

Primero, se han introducido los vectores de las abscisas y de las ordenadas de los datos que se quieren ajustar. Después, se ha seleccionado el tipo de función a ajustar, en este caso exponencial:

$$I(t) = a + b \cdot e^{-t/\tau} \quad (6)$$

donde t es el tiempo y a , b y τ los coeficientes de la función a determinar.

El programa permitía establecer los rangos que pueden tomar cada una de los coeficientes.

6. RESULTADOS

6.1. Efectos de la radiación solar sobre FLSCs

6.1.1. Periodo continuo de 12 horas

En la figura 19 se representa la intensidad emitida por la fibra y la temperatura en función del tiempo de exposición al iluminar cuatro fibras dopadas con LR durante 12 horas usando el simulador solar calibrado (AM1.5G). La señal emitida por las fibras se mantiene casi constante en ese periodo de tiempo, con un decrecimiento menor del 6% desde el valor inicial. Este resultado coincide con trabajos previos que demuestran que los colorantes como el lumogen son estables en periodos largos de tiempo en LSCs de PMMA [8]. La temperatura de las fibras aumenta rápidamente al inicio y se mantiene muy estable durante el resto del tiempo. Al apagar la lámpara, la temperatura decrece drásticamente hasta alcanzar la temperatura ambiente.

No se aprecian diferencias significantes en cuanto a la fotoestabilidad debido a la concentración del dopante ni al tipo de fabricación de la preforma (molde o extrusión). Lo único remarcable es el comportamiento de la fibra LR-m2 que alcanza el máximo de emisión después de 2 horas de iniciar el experimento. En cuanto a la longitud de onda media (λ_m) y FWHM de los espectros los resultados obtenidos de las fibras de LR molde se observa que λ_m se desplaza hacia el rojo y que FWHM disminuye a medida que la concentración aumenta. Comparando las fibras con la misma concentración, vemos que la fibra LR-e1 está desplazada hacia el azul y es más estrecha (ver tabla 5). El valor de λ_m en los experimentos con el simulador solar no varía con el tiempo por lo que en la tabla 5 solo aparece un valor.

Experimento	Fibra	λ_m (nm)	σ (nm)	FWHM (nm)
12 horas	LR-m1	652	30	70
	LR-m2	659	29	68
	LR-m3	664	28	66
	LR-e1	648	33	78

Tabla 5. Propiedades de los espectros de emisión de las fibras estudiadas con el simulador solar.

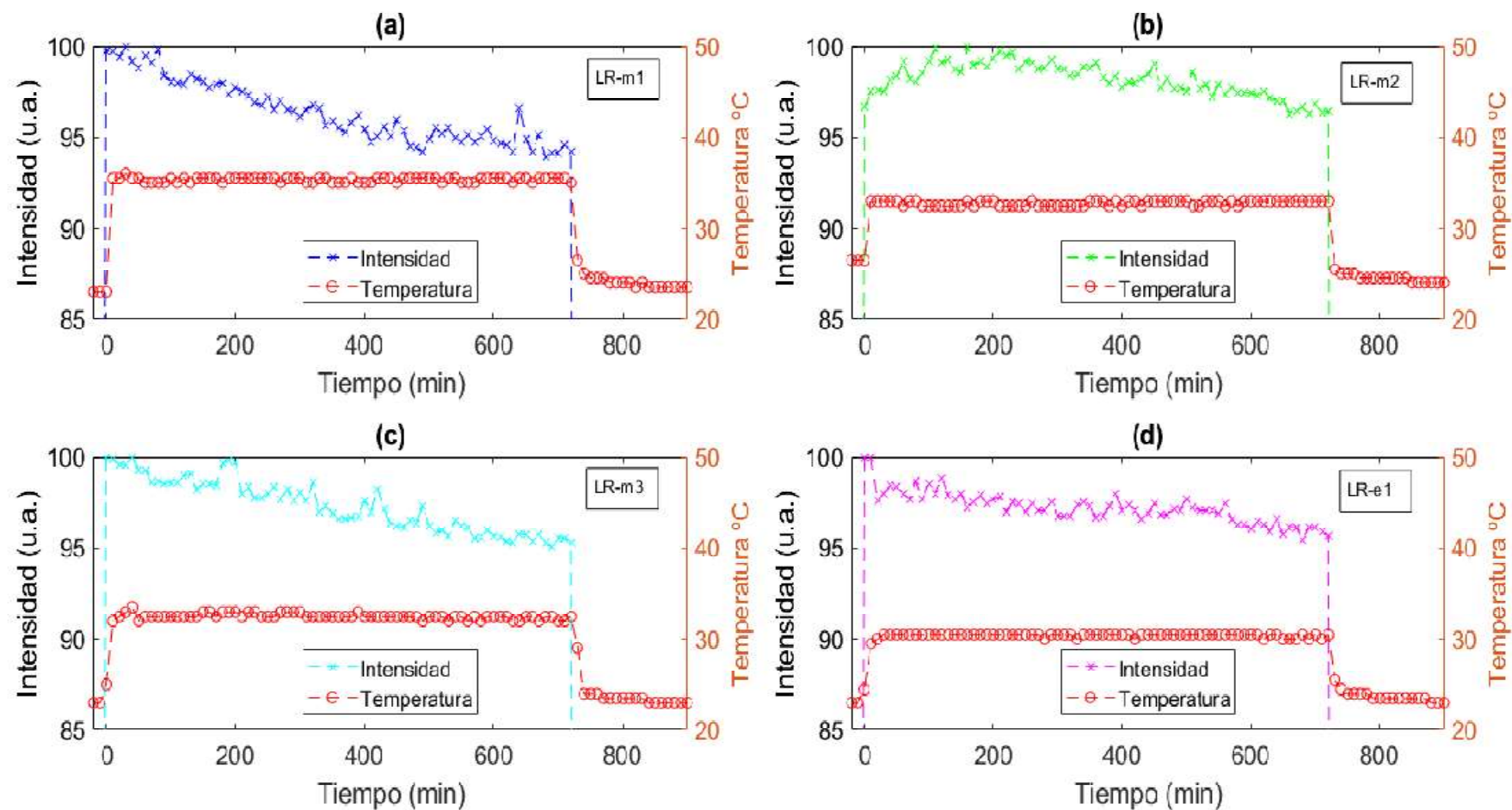


Figura 19. Intensidad emitida por las fibras y su temperatura en función del tiempo de las fibras lumogen red (LR) excitadas durante 12 horas con el simulador solar (AM 1.5G); (a): LR-m1; (b): LR-m2; (c): LR-m2; (d): LR-e1.

6.1.2. Ciclos LEO

En la figura 20 se muestran la intensidad y la temperatura en función del tiempo obtenidas de simular tres periodos de una órbita baja (54 minutos de exposición a la lámpara solar y 34 minutos de oscuridad) con el simulador solar en 3 fibras diferentes. La intensidad emitida apenas varía con el tiempo en ninguno de los casos analizados. No se aprecia apenas degradación (alrededor del 2% con el respecto al valor inicial) ni recuperación después del periodo de oscuridad. La variación de la temperatura de las fibras es similar, alcanzando la temperatura de equilibrio en cada ciclo en 5 minutos aproximadamente. Esta variación se puede ver en la figura 20 (c).

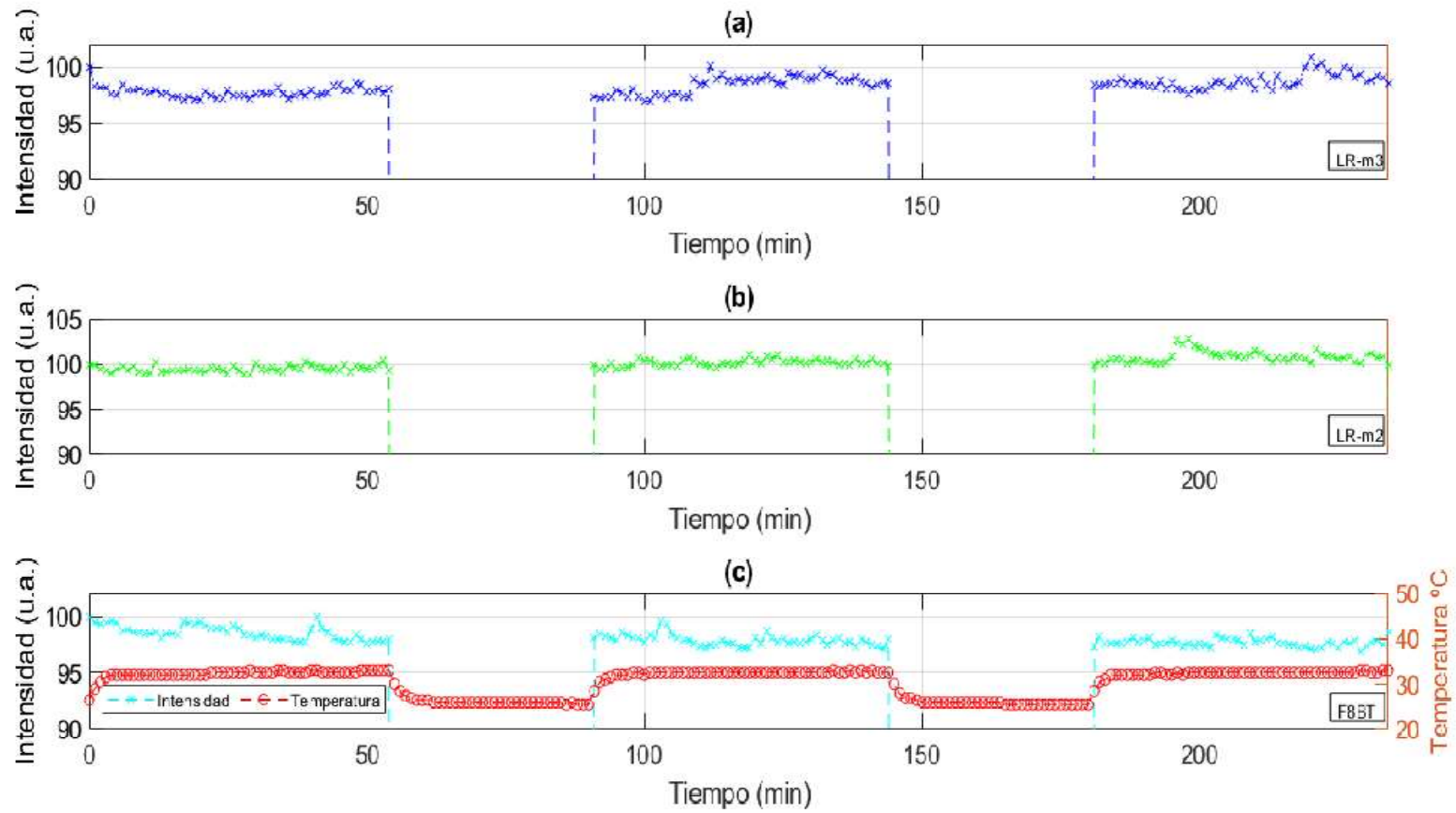


Figura 20. Intensidad en función del tiempo para varios ciclos en una órbita baja (LEO) excitando las fibras con el simulador solar (AM 1.5G); (a): LR-m3 (b): LR-m2; (c): F8BT. La evolución de la temperatura ha sido la misma en las tres fibras.

6.1.3. Ciclo: 16 horas de iluminación y 8 de oscuridad.

En este experimento se ha utilizado una fibra de LR-m3 iluminada durante 2 ciclos de 16 horas de luz (AM 1.5G) y 8 horas de oscuridad. Durante las primeras 16 horas, la degradación de la fibra se asemeja a la observada anteriormente en el experimento de las 12 horas, disminuyendo la intensidad un 5% (ver figura 21). Tras el periodo de oscuridad, existe un aumento en la intensidad (2%), lo que indica una leve recuperación en la eficiencia de la fibra. En el segundo periodo de 16 horas la intensidad disminuye más lentamente que en el primero, sufriendo una pérdida del 2% de la eficiencia en dicho tramo.

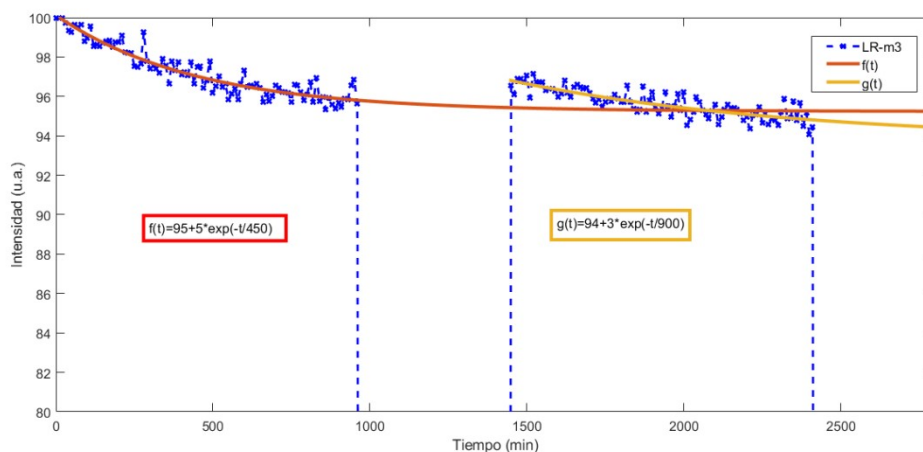


Figura 21. Intensidad emitida por la fibra LR-m3 en función del tiempo siendo excitada durante dos ciclos de 16 horas de luz y 8 de oscuridad con el simulador solar calibrado (AM 1.5G). Las líneas continuas son los ajustes a la Ecuación (6).

Las curvas obtenidas de los datos de las dos tandas de 16 horas se han ajustado a la función exponencial (Ecuación (6)):

$$I(t) = a + b \cdot e^{-t/\tau}$$

La constante a indica la intensidad normalizada al final del periodo, b indica la variación de intensidad en el periodo, y el valor $a+b$ representa la intensidad al principio del periodo. La constante τ representa un tiempo de decaimiento medio. El resultado de los ajustes viene descrito en la tabla 6. Los valores obtenidos coinciden con el análisis previo y se observa que la degradación es menor en el segundo periodo. Aunque, hay un error significativo en el valor del decaimiento temporal τ del segundo periodo, se puede decir que la fibra sufre una fotodegradación más lenta en el segundo periodo.

	$a=I(t=\infty)$	b (degradación)	$a+b=I(t=0)$	τ (min)	R^2
1º Periodo	$95 \pm 0,3$	$5 \pm 0,3$	$100 \pm 0,6$	450 ± 60	0,89
2º Periodo	94 ± 1	3 ± 1	97 ± 2	900 ± 500	0,68

Tabla 6. Valores del ajuste de la curva experimental del primer y segundo periodo de la figura 21 con la Ecuación (6). R^2 es el coeficiente de determinación del ajuste.

6.2. Efectos de la temperatura en los FLSCs

6.2.1. Rampa de temperatura (30-90 °C)

A continuación se muestran los resultados de calentar las fibras de 30 °C a 90 °C aumentando la temperatura 10 °C cada 20 minutos, dando así tiempo a la fibra a termalizar y permanecer estable a la temperatura del horno. La figura 22 sirve de ejemplo para observar cómo varía la temperatura del horno cuando se aplica la rampa de 30 °C a 90 °C. La gráfica de color rojo indica la temperatura objetivo en cada instante, es decir, la temperatura a la que se le ordena al horno que debe llegar. Los datos azules indican la temperatura del termopar dentro del horno. La temperatura aumenta de manera constante (1 °C/min) en el rango estudiado cuando se le aplica la rampa descrita. Por lo tanto, podemos concluir que, el horno tarda 10 minutos en aumentar su temperatura 10 °C, y que manteniéndolo 10 minutos más a dicha temperatura, ésta se mantiene constante dando tiempo suficiente para termalizar la fibra.

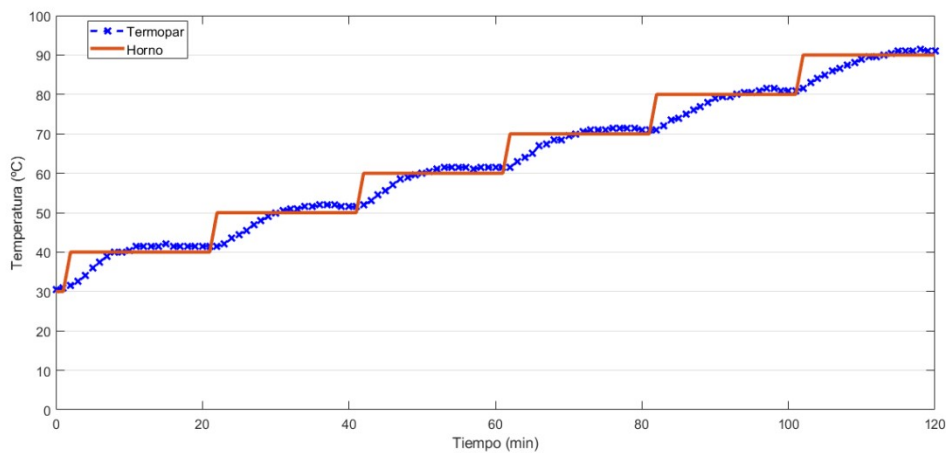


Figura 22. Calibración de la temperatura del horno en función del tiempo en el experimento de la rampa de 30 a 90 °C.

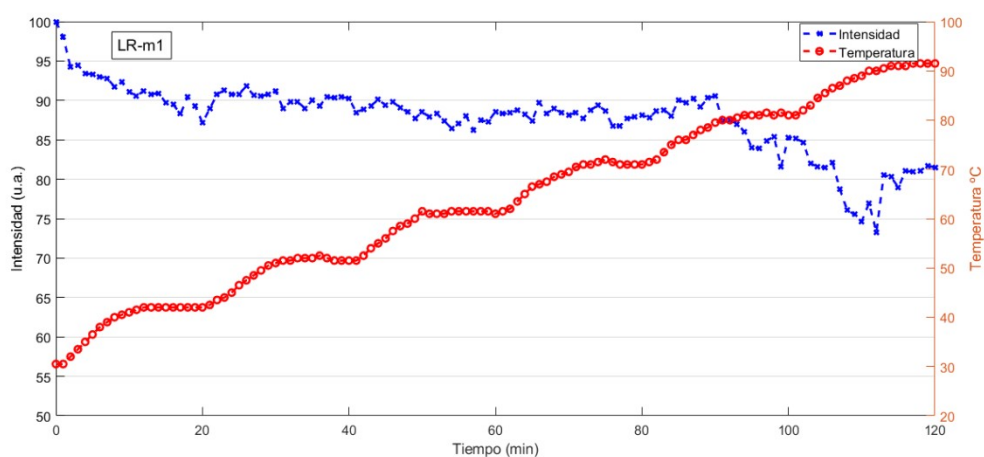


Figura 23. Variación de la intensidad y de la temperatura de la fibra LR-m1 en función del tiempo.

La figura 23 muestra la variación de la intensidad y de la temperatura de la fibra LR-m1 en función del tiempo. La rampa de temperatura es muy similar a la mostrada en la figura 22. Ocurre lo mismo con el resto de medidas. Es por ello que, a continuación, se muestran los resultados de este experimento en función de la temperatura; mostrando un solo valor de intensidad cada 10 °C, siendo éste un promedio de valores de intensidad. Este promedio corresponde con los valores de intensidad de las últimas 5 medidas realizadas de cada escalón en la rampa de temperaturas (30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 °C) (ver figuras 24 y 25).

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, se han utilizado dos fuentes de iluminación diferentes para este experimento ya que la lámpara interna del horno (halógena de 50W) se estropeó y hubo que utilizar una fuente externa (incandescente 60W) introduciéndola por el orificio superior del que dispone el horno. Las fibras LR-m1 y LR-e1 fueron iluminadas con la lámpara interna del horno, y la fibra LR-m3 con la lámpara externa. La misma fibra POF sin dopar se analizó con las dos lámparas, POF1 con la interna y POF2 con la externa.

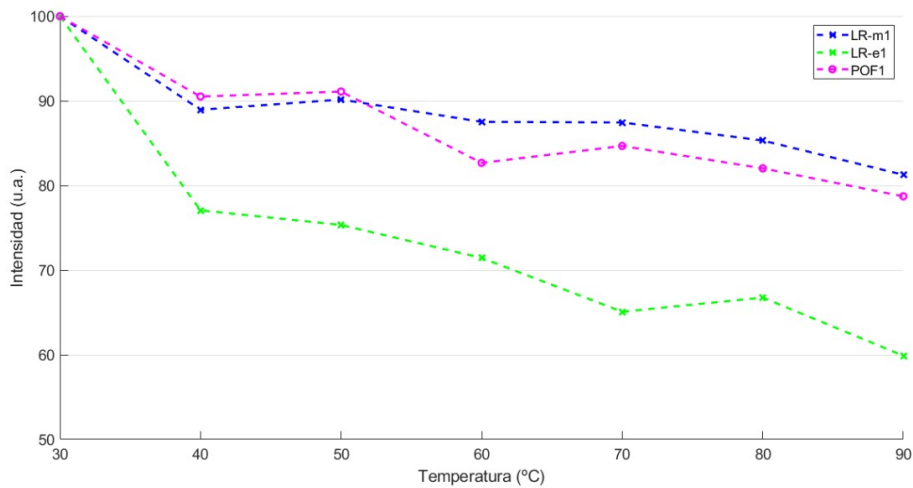


Figura 24. Intensidad en función de la temperatura de las fibras iluminadas con la bombilla interna (50W): LR-m1, LR-e1 y POF1.

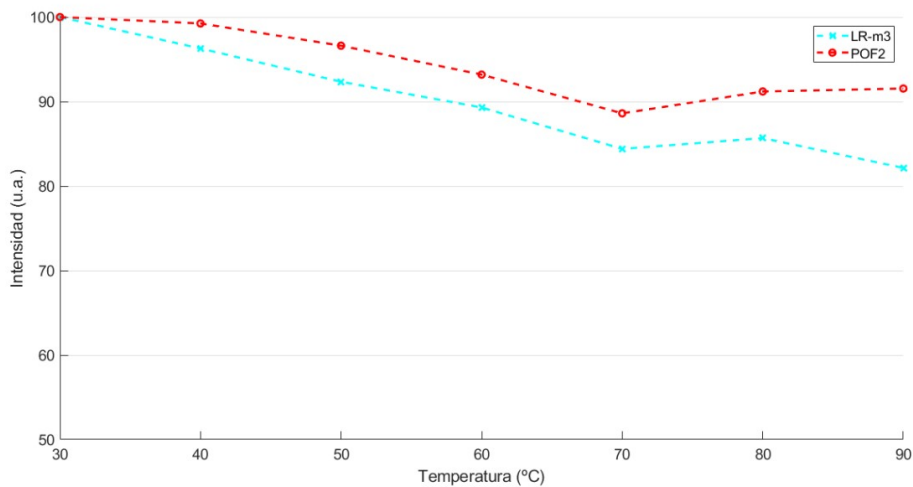


Figura 25. Intensidad en función de la temperatura de las fibras iluminadas con la bombilla externa (60W): LR-m3 y POF2.

La fibra que más se degrada es la LR-e1, la prefabricada por extrusión, sobre todo entre los 30 y los 40 °C donde la intensidad emitida desciende más de un 20%. Esto puede ser debido, entre otras razones, a las imperfecciones que presenta la estructura interna de la fibra. Las otras dos fibras dopadas con lumogen, LR-m1 y LR-m3, se comportan de manera muy similar en el rango de temperaturas estudiado. Las dos fibras presentan una degradación menor del 20% a 90 °C con respecto a los 30 °C iniciales. En cambio, la fibra sin dopar, POF1 y POF2, presenta una diferencia de degradación a 90 °C mayor del 10%. Es probable que se deba a que la fibra ya se encontraba algo degradada por haber sido utilizada anteriormente.

En la tabla 7 se muestran los valores de la longitud de onda media (λ_m), desviación estándar (σ) y FWHM de los espectros de emisión a diferentes temperaturas de las fibras estudiadas en este apartado. Se aprecia un corrimiento hacia el rojo las fibras LR-e1 y POF1, y en ensanchamiento del espectro de la fibra LR-e1.

Experimento	Fibra	λ_m a 30 °C (nm)	λ_m a 90 °C (nm)	σ a 30 °C (nm)	σ a 90 °C (nm)	FWHM a 30 °C (nm)	FWHM a 90 °C (nm)
Rampa	LR-m1	658	658	36	36	85	85
Temperatura 30-90 °C	LR-e1	670	672	58	62	137	146
	POF1	627	628	75	75	176	176

Tabla 7. Propiedades de los espectros de emisión en función de la temperatura.

6.2.2. Ciclos LEO (30-90 °C)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de realizar cuatro ciclos térmicos a las fibras analizadas que han consistido en calentar la fibra desde 30 °C hasta 90 °C, permanecer 40 minutos a dicha temperatura y enfriarla otra vez hasta 30 °C, simulando en lo posible una órbita LEO. En la figura 26 se muestra el comportamiento de la fibra LR-m3. En el primer ciclo se observa claramente cómo la intensidad decae con el aumento de la temperatura hasta un 10-20% y se mantiene entre 80% y 90% cuando la temperatura alcanza los 90 °C. En el resto de ciclos la intensidad se mantiene constante en casi todo momento, independientemente de la temperatura, aunque los máximos de intensidad de cada ciclo ocurren cuando la temperatura está subiendo. Tampoco se aprecia una recuperación de la fibra después del periodo de oscuridad y descenso de temperatura como si ocurría en el experimento de los ciclos de 16 horas con el simulador solar. En este caso, la fibra sufre un decaimiento inicial en el primer ciclo térmico, y tras ello se mantiene bastante estable en el resto de ciclos.

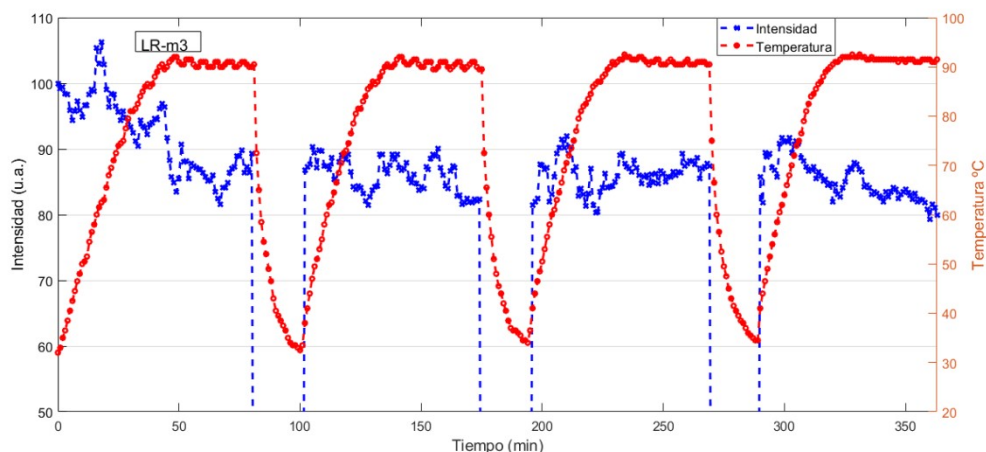


Figura 26. Intensidad y temperatura en función del tiempo de la fibra LR-m3 siguiendo 4 ciclos de temperatura (30°C-90°C).

Por último, en la figura 27 se muestra el espectro de emisión de la fibra TR al inicio de este experimento. Se observan dos espectros superpuestos, uno estrecho centrado en 615 nm y otro, ancho, en 700 nm aproximadamente. El primero corresponde con el pico de emisión del dopante europio ($\text{EU}(\text{TTFA})_3\text{Phen}$). La banda, la parte ancha, es lo que transmite el revestimiento de la fibra TR.

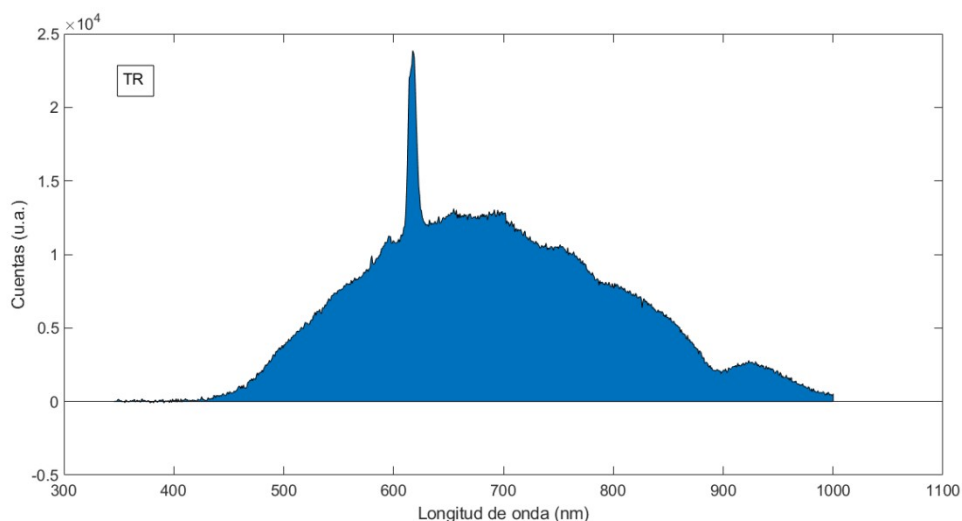


Figura 27. Espectro de emisión de la fibra TR a 30 °C.

En la figura 28 se muestra el comportamiento de la fibra TR. La gráfica roja muestra la temperatura del horno, la gráfica azul la intensidad total del espectro de emisión de la fibra, y la verde la intensidad correspondiente al pico de emisión de europio visto en la figura 27. Las medidas de intensidad correspondientes a los primeros 52 minutos no se incluyen en la figura. La fibra, antes de iniciar el experimento, no estaba del todo recta; estaba curvada a pesar del pequeño tamaño de la muestra. Cuando

el horno cogió cierta temperatura la fibra se enderezó y por ello empezó a emitir más intensidad ya que la luz le incidía desde otro ángulo. A partir de entonces, no se volvió a curvar en ningún momento y por tanto, el resto de medidas del experimento las hemos incluido. Se aprecia que la intensidad total y la que corresponde al pico de emisión del dopante, emiten de manera similar cuando la temperatura es cercana a 90°C. Sin embargo, presentan un comportamiento totalmente diferente a temperaturas más bajas. Mientras que la intensidad total de la fibra se comporta parecida a la fibra LR-m3, oscilando entre un decaimiento de 0 y 10%, la intensidad emitida que corresponde al europio disminuye a medida que aumenta la temperatura en todos los ciclos térmicos, pero se recupera totalmente de ciclo a ciclo.

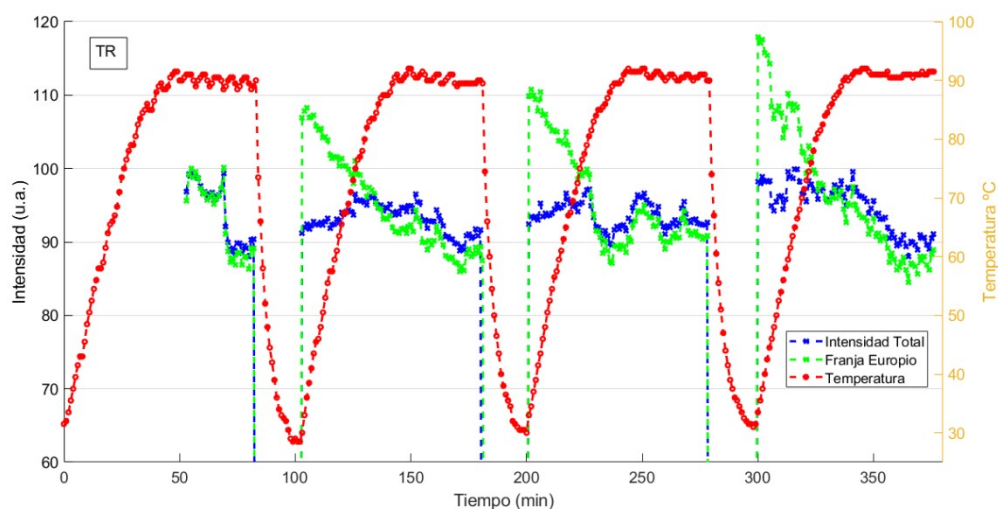


Figura 28. Intensidad y temperatura en función del tiempo de la fibra TR siguiendo 4 ciclos de temperatura (30°C-90°C).

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado experimentalmente los efectos de la radiación solar y la temperatura en concentradores solares de fibras luminiscentes (FLSCs) para aplicaciones en entornos espaciales. Se ha medido la intensidad emitida por las fibras ópticas de polímero dopadas en función del tiempo y/o de la temperatura y se han comparado los resultados de fibras con diferentes concentraciones, métodos de fabricación y dopantes. Los materiales dopantes utilizados han sido el colorante orgánico lumogen red, el polímero conjugado (F8BT) y el material metálico-orgánico basado en la tierra rara europio.

En cuanto a la fotoestabilidad de las fibras iluminándolas con un simulador solar calibrado con la intensidad espectral estándar de la superficie terrestre (1000 W/m^2 y AM 1.5G) se ha detectado un decaimiento de la intensidad emitida por las fibras menor del 6% durante un periodo de iluminación de 12 horas. En los ciclos de iluminación que simulan una órbita LEO, la intensidad emitida apenas varía con el tiempo en ninguna de las fibras analizadas. No se han apreciado diferencias significativas en estos resultados

para las diferentes concentraciones y métodos de fabricación del dopante LR. La medida realizada de la fibra de LR de más concentración, LR-m3, iluminándola durante 2 ciclos de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad, muestra una degradación similar a la observada en los anteriores experimentos, y una leve recuperación en la eficiencia de la fibra tras el periodo de oscuridad. Si bien la intensidad espectral estándar fuera de la atmósfera terrestre (AM0) es de 1353 W/ m^2 y con una distribución espectral ligeramente diferente de la de AM1.5G, los experimentos realizados nos dan una información muy valiosa acerca de qué efectos tendría la radiación solar en el espacio en las fibras.

Por otro lado, se ha visto que las fibras de LR de molde sufren un decaimiento de la intensidad emitida menor del 20% cuando se calientan hasta una temperatura de 90 °C. También se ha medido la intensidad emitida por la fibra LR-m3 aplicando varios ciclos térmicos LEO observando que la intensidad sufre un decaimiento del 20% en el primer ciclo manteniéndose constante en los sucesivos ciclos térmicos. Finalmente, se ha medido la intensidad emitida por la fibra TR aplicando varios ciclos térmicos LEO. Las medidas indican una fuerte transmisión de la luz incidente a través del revestimiento de la fibra, así como una degradación de la emisión debida al europio con el aumento de la temperatura, recuperándose totalmente de un ciclo térmico a otro.

Por lo tanto, podemos concluir que los FLSCs son una alternativa plausible a los paneles solares utilizados actualmente en el espacio aunque no es realista pensar que vayan a lanzarse satélites equipados con esta tecnología a corto o medio plazo. Además, hoy en día, los LSCs no son tan eficientes como las células PV. La tecnología de los FLSCs es todavía demasiado nueva y deben realizarse más trabajos de investigación que respalden los resultados de este trabajo, además de prototipos que puedan ser testados en el espacio. Las ventajas de los FLSCs frente a los paneles solares PV, como son el bajo coste y una potencia específica muy superior (hasta 2 kW/kg) aseguran que se siga investigando en este campo y que quizá pronto se puedan fabricar LSCs tan eficientes como las células PV y que sea rentable su uso en entornos espaciales [12].

8. LINEAS FUTURAS

En este apartado se presentan algunas de las futuras líneas de investigación que se derivan de este trabajo:

- Estudiar el efecto que tiene el revestimiento en la variación de la emisión de las fibras dopadas con la temperatura.
- Estudiar la fotoestabilidad y el efecto de la temperatura en fibras codopadas con un material metálico-orgánico basado en la tierra rara europio y un colorante orgánico.
- Realizar ciclos térmicos LEO de forma más realistas utilizando el horno tanto para calentar las fibras como para enfriarlas ya que el horno puede alcanzar temperaturas de hasta -70°C .
- Estudiar el efecto de la radiación solar AM0 en las fibras. El grupo de investigación tendrá en breve a su disposición un simulador solar calibrado a AM0.

Referencias

- [1] BP. Statistical Review of World Energy 2020. [En línea] <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [2] W. H. Weber and J. Lambe. "Luminescent greenhouse collector for solar radiation". *Applied Optics*, 15(10), 2299 (1976).
- [3] K.R. McIntosh, N. Yamada, y B.S. Richards. "Theoretical comparison of cylindrical and square-planar luminescent solar concentrators". *Applied Physics B*, 88(2):285-290 (2007).
- [4] G. Colantuono, A. Buckley, y R. Erdelyi. "Ray-Optics Modelling of Rectangular and Cylindrical 2-Layer Solar Concentrators". *Journal of Lightwave Technology*, 31(7), 1033-1044 (2013).
- [5] O. Y. Edelenbosch, M. Fisher, L. Patrignani, W. G. J. H. M. van Sark, y A. J. Chatten. "Luminescent solar concentrators with fiber geometry". *Opt. Express* 21, A503-A514 (2013).
- [6] E.-H. Banaei y A. F. Abouraddy, "Design of a polymer optical fiber luminescent solar concentrator", *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 23(4), 403–416 (2015).
- [7] S. F. H. Correia, P. P. Lima, P. S. André, M. R. S. Ferreira, y L. A. D. Carlos, "High-efficiency luminescent solar concentrators for flexible waveguiding photovoltaics", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 138, 51–57 (2015).
- [8] I. Parola, E. Arrospe, F. Recart, M. A. Illarramendi, G. Durana, N. Guarrotxena, O. Garca, y J. Zubia. "Fabrication and Characterization of Polymer Optical Fibers Doped with Perylene Derivatives for Fluorescent Lighting Applications". *Fibers*, 5(28), 1-11 (2017).
- [9] I. Ayesta, M.A. Illarramendi, J. Arrue, I. Parola, F. Jimenez, J. Zubia, A. Tagaya y Y. Koike. "Optical Characterization of Doped Thermoplastic and Thermosetting Polymer-Optical-Fibers". *Polymers* (2017)
- [10] E. Banaei. "Polymer Optical Fibers For Luminescent Solar Concentration". *Electronic Theses and Dissertations*. 2930. (2013).
- [11] R. J. Sedwick y M. H. Sanders. "Thermal Design and Performance of a Luminescent Solar Concentrator for Space Power Generation". *Journal of Spacecraft and Rockets* 56:6, 1831-1837 (2019).
- [12] D. R. Needell y otros., "Ultralight Luminescent Solar Concentrators for Space Solar Power Systems" 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA, pp. 2798-2801 (2019).

[13] E. Daly, A. Glover y A. Hilgers. “Effects on spacecraft hardware and operations. In: Space Weather- Physics and Effects”. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg (2007).

[14] J. Chen, N. Ding, Z. Li y W. Wang. “Organic polymer materials in the space environment”. Progress in Aerospace Sciences, Volume 83, Pages 37-56 (2016).

[15] M. H. Sanders y R. Sedwick. “Characterization of Luminescent Materials for Application in the Space Environment” (tesis doctoral). University of Maryland, College Park (2014).

[16] J. Li, S. Yan y R. Cai. “Thermal analysis of composite solar array subjected to space heat flux”. Aerospace Science and Technology, Volume 27, Issue 1, Pages 84-94 (2013).

[17] F.J. Meseguer, F. Cussó, F. Jaque y C. Sánchez. “Temperature effects on the efficiency of Luminescent Solar Concentrator (LSC) for photovoltaic systems”. Journal of Luminescence, Volume 24–25, Part 2, 865-868 (1981).

ANEXO 1. Código del programa de procesado de datos en Python

```
import csv
from pathlib import Path

# instrucciones

OUTPUT_FILENAME = 'output.csv'
EXCLUDED_EXTENSIONS = ['.py', '.csv']

# identifica los archivos que se quieren procesar

def find_txt_files():
    all_files = []
    for file in Path.cwd().iterdir():
        if not file.is_file():
            continue
        if file.suffix in EXCLUDED_EXTENSIONS:
            continue
        all_files.append(str(file))
    return all_files

def file_to_dict(path):
    content = []
    with open(path) as file:
        for line_number, line_content in enumerate(file):
            if line_number >= 8:
                content.append(line_content)
    content = [x for x in content if x != '\n']
    return content

# importa la columna de las longitudes de onda

def get_wave_lengths(file_content):
    return [get_wave_length_from_line(line) for line in
file_content]

def get_wave_length_from_line(line_content):
    return line_content.split(';')[0].strip()

# importa los valores de la columna de cuentas sin dark

def split_by_semicolon(line_content):
    return line_content.split(';')[4].strip()

# guarda los valores en el archivo .csv

def save_to_file(content):
    with open(OUTPUT_FILENAME, 'w') as csvfile:
```

```

        spamwriter = csv.writer(csvfile, delimiter=';')
        for record in content:
            spamwriter.writerow(record)

# programa principal

def main():
    files = find_txt_files()
    imported_files = [file_to_dict(path) for path in files]

    wave_lengths = get_wave_lengths(imported_files[0])
    measurements = []
    for file in imported_files:
        file_data = [split_by_semicolon(line) for line in file]
        measurements.append(file_data)

    headers = ['wave_length', *range(len(measurements))]
    headers = [str(x) for x in headers]
    result = [headers,]

    for record in zip(wave_lengths, *measurements):
        result.append(record)

    save_to_file(result)

main()

```